

GEOCHEMICAL EXPLORATION

Proceedings, 3rd International
Geochemical Exploration Symposium,
Toronto, April 16—18, 1970

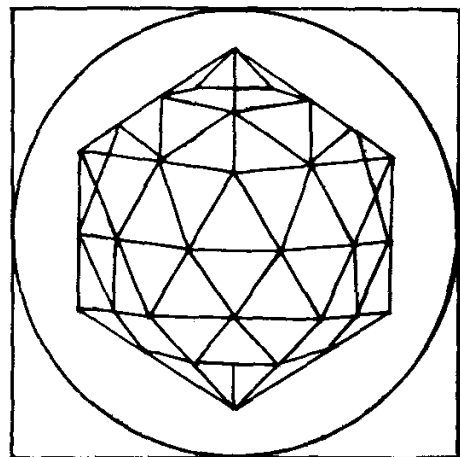
THE CANADIAN INSTITUTE OF MINING AND METALLURGY
SPECIAL VOLUME 11

1971

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ПОИСКИ

Под редакцией

Р. Бойла



НАУКИ
О ЗЕМЛЕ

Фундаментальные
труды
зарубежных
ученых
по геологии,
геофизике
и геохимии

ИЗДАТЕЛЬСТВО
«МИР»
МОСКВА 1973

ПЕРЕВОД С АНГЛИЙСКОГО

В. В. ГЕРАСИМОВСКОГО, М. Ф. КУЗИНА, |
Л. А. ЛЕОНТЬЕВОЙ, В. М. МАКАГОНА,
В. А. МАКРЫГИНОЙ, П. П. СМОЛИНА

ПОД РЕДАКЦИЕЙ И С ПРЕДИСЛОВИЕМ

д-ра геол.-мин. наук
С. В. ГРИГОРЯНА

Переводчик 1994

В книге обобщен международный опыт в области применения и оценки различных геохимических методов поисков месторождений полезных ископаемых. В ней рассмотрены поиски по вторичным ореолам рассеяния в рыхлых отложениях, региональное геохимическое прогнозирование на основе изучения геохимической специализации геологических комплексов, оценка первичных геохимических ореолов рудных месторождений, опыты геохимических поисков с самолетов и вертолетов, математическая обработка геохимической информации на ЭВМ. Интересны новые данные об использовании стабильных изотопов при поисках, разработка алгоритмов для программ геохимических поисков. Книга предназначена для геохимиков и геологов, занятых поисками полезных ископаемых, научных работников в этой области, а также преподавателей и студентов геологических вузов и геологических факультетов университетов.

Геохимические методы поисков рудных месторождений, зародившиеся в 30-х годах XX в. в СССР, в настоящее время прочно вошли в повседневную практику геологоразведочных работ как у нас в стране, так и за рубежом.

Последние годы характеризуются бурным развитием геохимических методов поисков рудных месторождений, совершенствуются научные основы этих методов, постоянно расширяется круг задач, при решении которых в той или иной степени используются различные модификации геохимических методов.

В настоящую книгу вошли наиболее интересные доклады иностранных ученых, представленные на III Международный симпозиум по геохимическим методам поисков месторождений полезных ископаемых.

По всем обсуждавшимся на симпозиуме проблемам были представлены также приводимые ниже доклады советских ученых, которые в русское издание книги не включены, поскольку содержащиеся в них положения с большей степенью детальности освещены в ряде работ, опубликованных у нас в стране.

Л. В. Таусон, Л. Н. Овчинников, В. В. Поликарпочкин, С. В. Григорян, «Применение и развитие методов геохимических поисков рудных месторождений в СССР».

Л. Н. Овчинников, С. В. Григорян, «Первичные ореолы в разведке сульфидных месторождений».

В. В. Поликарпочкин, Н. А. Китаев, «Эндегенные ореолы эпитермальных золотосодержащих месторождений».

Б. М. Шмакин, В. А. Макрыгина, М. П. Глебов, Ф. Я. Загорский, «Использование петрографо-геохимических поисковых методов для выявления скрытых месторождений мусковита в различной геологической обстановке».

Л. В. Таусон, С. Г. Петровская, «Типы эндогенных ореолов гидротермальных месторождений молибдена».

В. А. Соколов, А. А. Геодекан, Г. Г. Григорьев, А. Я. Кремс, В. А. Строганов, Л. М. Зоркин, М. И. Зейдельсон, С. Я. Вейнбаум, «Новые методы газовой съемки, исследования газа в скважинах и некоторые практические результаты».

В. А. Соколов, «Теоретические основы геохимических поисков нефти и природного газа и тенденции их развития».

В. В. Поликарпочкин, «Количественная оценка рудоносных площадей по данным опробования гидрографической сети».

Проведение геохимических поисков, как известно, связано с отбором и анализом большого количества проб, а также обработкой огромной цифровой информации. В этой связи понятен тот интерес, который проявляют специалисты по геохимическим методам поисков не только к проблеме разработки научных и методических основ геохимических поисков, но и к вопросам использования при геохимических исследованиях различных аналитических методов, а также программ обработки цифровой информации с помощью электронно-вычислительных машин. Именно этим обусловлено большое разнообразие тематики докладов, представленных на симпозиум.

Для специалистов, занимающихся поисками рудных месторождений, будут интересны данные об организации и проведении геохимических поисков по программам ООН, приведенные в докладе К. Лепелтье. Значительная информация о проведении геохимических поисков в Канаде, где в последние годы они заметно расширились, содержится в докладе И. Никола.

Интересный в практическом отношении вопрос комплексирования геохимических методов поисков в районах распространения многолетней мерзлоты и моренно-ледниковых отложений рассмотрен в обстоятельной работе Р. Дж. Аллана и Е. Х. У. Хорнбрука (на примере Северо-Западных территорий Канады).

Ряд докладов посвящен рассмотрению вопросов геохимических методов поисков различных типов рудных месторождений (урановые — С. Бовье и др.; ртутные — М. Деллаглио и др.), а также примерам использования геохимических методов в конкретных рудных районах (работы Р. Хорснейла, К. Хоскинга, Ф. Смита и др.). В этих исследованиях основное внимание уделено вторичным литогеохимическим ореолам и потокам рассеяния элементов-индикаторов рудных месторождений, значение которых трудно переоценить в так называемых «закрытых»

районах, где коренные рудоносные породы перекрыты рыхлыми отложениями различной мощности и не имеют выхода на дневную поверхность. Следует отметить, что общим для всех этих работ недостатком является ограниченный круг исследованных элементов-индикаторов, а также отсутствие данных о связи особенностей распределения элементов-индикаторов в экзогенных ореолах и подстилающих их коренных породах (первичные ореолы), что, как известно, существенно затрудняет интерпретацию экзогенных аномалий.

Обладая значительной вертикальной протяженностью над рудными месторождениями (сотни метров), первичные ореолы являются эффективными признаками слепого оруденения, и поэтому их значение особенно велико в районах, уже освоенных горнорудной промышленностью, где основным источником минерального сырья остается слепое оруденение. Представленные на симпозиум доклады свидетельствуют о возросшем за последние годы интересе зарубежных ученых к этой проблеме. Очень важны результаты использования факторного анализа при изуче-

нии первичных ореолов одного из сульфидных месторождений Швеции (Б. Наирис).

Весьма ценными представляются данные ряда ученых о возможности использования устойчивых изотопов при геохимических поисках (работы М. Шима и Х. Тода, М. Дженсена и др.).

Специалисты, занимающиеся поисками месторождений полезных ископаемых, несомненно, заинтересуются обстоятельными работами Р. Беннета, Б. Кука и др., А. Дарнли и Р. Грести, О. Вейсса, посвященными аэрогеохимическим методам поисков.

Читатель познакомится также с рядом весьма актуальных работ по математической и машинной обработке цифровой геохимической информации.

Отметим, что, несмотря на большое разнообразие тематики, все включенные в настоящую книгу доклады посвящены одной чрезвычайно актуальной проблеме — разработке эффективных геохимических методов поисков рудных месторождений.

ПРЕДИСЛОВИЕ К АНГЛИЙСКОМУ ИЗДАНИЮ

Третий Международный симпозиум по геохимическим методам поисков месторождений полезных ископаемых состоялся по инициативе геологического отделения Канадского института горного дела и металлургии и Общества экономической геологии. В работе симпозиума, состоявшегося в Торонто (Онтарио, Канада) 16—18 апреля 1970 г., принимали участие 700 представителей из 26 стран.

Программа симпозиума включала 110 докладов по различным проблемам геохимических поисков. Кроме пленарного, состоялись специальные секционные заседания по вопросам аэрогеохимических поисков, геохимических по-

исков нефти и газа, первичных ореолов и лито-геохимических методов, статистической обработки и оценки геохимической информации. Посещаемость участниками симпозиума заседаний секций аэрогеохимических методов, методов поисков нефтяных и газовых месторождений, а также статистической обработки и оценки превзошла все ожидания, что свидетельствует о возросшем интересе к этим новым методикам.

В настоящий сборник включены доклады, а также тезисы, представленные или прочитанные на симпозиуме.

Р. В. Бойл

НАЗЕМНЫЕ
ГЕОХИМИЧЕСКИЕ
МЕТОДЫ
ПОИСКОВ

ВВЕДЕНИЕ

Целью данной статьи является краткая характеристика значения геохимических поисков в программах ООН. С 1960 г. Программа развития ООН (ПРООН) субсидировала среди многих других также ряд поисковых проектов в области изучения геотермальных, водных и минеральных ресурсов. Здесь будут рассмотрены только последние.

Первый проект геологопоисковых работ ООН начал осуществляться в конце 1960 г., и с того времени 66 основных проектов, финансируемых специальным фондом ПРООН совместно со странами-хозяевами, были переданы ООН как организации-исполнителю. Эти проекты направлены на выявление минеральных месторождений и подготовку специалистов по различным методам поисков.

Кроме собственно аэрогеологических съемок, аэрогеофизических поисков и работ в пределах берегового шельфа, а также экономических или промышленных исследований и организации институтов, наземным поискам руд посвящены 54 проекта, 48 из которых включают геохимические поиски различного характера от вспомогательных анализов до систематической рекогносцировочной съемки и последующих более детальных исследований. Другими словами, 73% всех геологопоисковых работ включают геохимические поиски, и доля их возрастает до 89%, если учитывать только наземные проекты, направленные на поиски рудных месторождений. На декабрь 1969 г. из этих 48 проектов, использовавших (или использующих) геохимию как метод поисков, 25 были завершены, а 19 находились в действии. Для данного обзора были собраны сведения по 41 проекту; по остальным семи работы развернуты еще недостаточно широко, чтобы приводить здесь их результаты.

ОБЗОР ПРОЕКТОВ

В течение последних десяти лет было собрано и проанализировано колориметрическим, атомно-абсорбционным и спектральным методами около 430 тыс. проб. За девять лет в различных лабораториях, полностью организованных ООН или предоставленных местными организациями стран-участниц, было сделано более 1 900 000 определений широкого круга химических элементов. За период с 1961 по 1969 г. (свыше девяти лет) в среднем в год отбиралось около 48 тыс. проб и производилось 210 тыс. геохимических определений. Однако в течение этого времени работа постоянно расширялась, и в настоящее время цифры еще более впечатляющи. В начале 1970 г. действует 19 проектов, включающих геохимические поиски, и к концу года их будет 25 (15 в Африке, 7 в Латинской Америке, 2 на Среднем Востоке и один в Азии).

По этим 25 проектам будет взято около 100 тыс. проб и сделано 600 тыс. определений. Цифры обобщают последние данные, полученные из районов исследований, и точно отражают объем геохимических исследований ООН в 1970 г.

Прогнозы на будущее затруднены из-за неясной общей тенденции деятельности ПРООН в области разведки природных ресурсов. Очевидно, что с ростом числа геологопоисковых проектов соответственно возрастет абсолютный объем геохимических исследований. Однако даже на современном уровне исследований сравнительное значение геохимии в каждом отдельном проекте в ближайшее время будет, вероятно, расти, особенно если учесть увеличение количества элементо-определений в каждой пробе. Таким образом, объем аналитических данных, по всей вероятности, значительно увеличится и возникнут новые проблемы их обработки и интерпретации.

В последние годы наблюдалась тенденция к большей специализации персонала и к совершенствованию аналитической техники и интерпретации результатов. Около пяти лет назад трудности, связанные с длительностью аналитических определений, были устранены благодаря внедрению атомно-абсорбционной спектрофотометрии. Большинство лабораторий, работающих по проектам ООН, в настоящее время оборудованы атомно-абсорбционными установками, в основном марки Перкин-Элмер, Джаррел-Эш и Тектрон. Сейчас действует 19 таких приборов.

Расширяется использование эмиссионной спектрографии и (в некоторых случаях) рентгенофлюоресценции. После завершения проекта аналитическое оборудование обычно передается правительственным учреждениям стран-участниц. В области интерпретации данных мы перешли от чисто эмпирической стадии к статистическому анализу и обработке данных на ЭВМ.

Прямым следствием этой технической эволюции была специализация штата, занятого геохимическими поисками. В начале 60-х годов многие проекты имели весьма ограниченный (если вообще имели) объем геохимических исследований, выполнение которых входило в обязанности одного из геологов. Этот «мастер на все руки» был и геолог, и геохимик, и химик. Подобная ситуация сейчас встречается все реже, и я не ошибусь, если скажу, что по крайней мере по рассматриваемым проектам она практически исчезает. Сейчас появляется новый вид исследователя — геохимик.

Совершенно ясно, что геохимические поиски в настоящее время требуют совместной работы различных специалистов. Наряду с геохимиком, который несет главную ответственность за направление работ, руководит их выполнением и интерпретацией результатов, в лаборатории обычно есть и химик. В трудных и особо важных случаях, а также на ответственных стадиях исследований приглашаются консультанты, преимущественно в период выработки направления, составления проекта и для интерпретации результатов. Нет причин предполагать, что в ближайшее время возникнут какие-либо изменения в направлении технического совершенствования и более узкой специализации персонала.

Геохимия является в настоящее время хорошо отлаженным методом почти во всех геолого-поисковых проектах ООН, и ее роль и эффективность особенно значительны на рекогносцировочной стадии поисков. Рекогносцировочные съемки по донным осадкам составляют основную часть геохимических работ. Такая съемка

дает значительные преимущества для понимания региональной геологии, а это большое достоинство, особенно в условиях пересеченной местности тропических и экваториальных стран, где геология изучена слабо. Это компенсирует низкие темпы геологической съемки и исключает необходимость иметь многочисленный штат. Некоторые из этих съемок по донным отложениям были особенно успешными, о чем сообщается ниже. Рассматриваемый метод используется как для рекогносцировочной региональной съемки в неизученных районах, так и в районах, уже покрытых аэрофото-, геологической или аэрогеофизической съемкой. Следует отметить, что до сих пор по проектам ООН не производились ни гидрогеохимические, ни биогеохимические исследования. Последующая детальная геохимическая съемка обычно сопровождается крупномасштабным геологическим картированием и наземными геофизическими исследованиями.

В отличие от геофизических исследований, которые в основном проводят подрядчики, геохимическая съемка производится, по существу, штатом ООН. Помощь извне заключается лишь в следующем:

кратковременные консультации геохимиков на наиболее ответственных этапах исследований;

проведение контрольных или специальных анализов частными или государственными лабораториями по контрактам;

обработка данных на ЭВМ через консультантов или подрядчиков.

Отличительной особенностью исследований, проводимых ООН, является их чрезвычайное разнообразие. Разнообразны направления исследований, их масштабы, географическое распределение и климатические условия, а также выполняющие их специалисты.

а. Чисто поисковые программы, как рекогносцировочные, так и более детальные, составляют большую часть работ. Кроме того, геохимические поисковые работы ведутся в субсидируемых ООН институтах и геологических центрах, например, в Иране, на Филиппинах [1] и в Иордании, деятельность которых в основном направлена на обучение и повышение квалификации геологических кадров. Наконец, проводятся экспериментальные исследования, целью которых является обоснование направления будущих работ; примером может служить проект, осуществлявшийся на Кипре.

б. Общее значение отдельных видов работ также различно. Это и вспомогательная съемка, при которой отбирается всего несколько сотен проб и выполнение первых тысяч анализов

(Нигерия, Филиппины), и полные программы с рекогносцировочной съемкой и последующими более детальными исследованиями. В последнем случае по одному проекту может предусматриваться отбор около 10 тыс. проб и около 60 тыс. определений в год, как, например, в Панаме, Гватемале или Малайзии (Сабах). Соответственно различны материальная база и техническое оснащение. Аналитические работы производятся на месте (в полевых лабораториях) или в центральной лаборатории. Степень сложности обработки данных для их интерпретации также различна: от простой зарисовки профиля до анализа тренда поверхности.

в. Что касается географического распространения этих работ, то они проводятся по всему земному шару южнее 40° с. ш. ООН осуществляла или осуществляет проекты в Азии и Юго-Восточной Азии (Соломоновы острова, Индия, Малайзия), на Среднем Востоке (Кипр, Иран, Турция), в Африке (Эфиопия, Сенегал, Замбия), в Южной Америке (Боливия, Чили, Эквадор) и в Центральной Америке (Гватемала, Мексика, Панама). Здесь перечислены далеко не все страны, в которых ООН проводит геохимические работы.

Столь широкое распространение работ определяет проведение исследований во всех возможных условиях рельефа: от Боливийского высокогорного плато в Андах до холмов Сенегала и от болот Панамы до пустынь ЮАР. Климатические условия районов работ изменяются от самых засушливых (пустыня Атакама в Чили, полусухие саванны Нигера) до очень влажных (тропики Никарагуа и экваториальные джунгли в бассейне Конго и в Гвиане).

г. Кто же осуществляет такую большую и разнообразную работу? В отличие от геофизических исследований, большая часть которых проводится по контрактам с частными фирмами, геохимические работы до сих пор полностью проводились сотрудниками ООН. С 1961 г. приглашено на работу 20 геохимиков, 16 химиков и 6 временных консультантов. Интересно отметить, как распределяются страны, из которых прибыли специалисты. Двадцать геохимиков, участвовавших в проектах ООН, приехали из 12 стран: 14 из Европы, 2 из Латинской Америки, 2 из США и Канады, 1 из Азии и 1 из Африки.

Следует отметить, что девять из 14 европейских геохимиков, т. е. 65% общего числа, прибыли из Восточной Европы, а именно из СССР, Чехословакии и Польши. Это данные в среднем за последние девять лет, а современная ситуация еще более поразительна: из 13 работающих геохимиков девять прибыли из Во-

сточной Европы, что составляет 70%, и эта тенденция уже стабилизировалась.

Химики-аналитики тоже приехали из самых различных стран, но распределяются более равномерно: 16 химиков (11 из них работают и сейчас) прибыли из 13 различных стран (4 из Северной Америки, 1 из Азии, 1 из Африки, 10 из Европы и только 3 — из Восточной Европы).

В программе ООН принимают участие семь консультантов. Они представляют пять различных стран, но здесь картина противоположная по сравнению с геохимиками: четверо из США и Канады и трое из Западной Европы.

Здесь я должен упомянуть проф. А. А. Беуса из СССР, который до ноября 1971 г. руководил геохимическими программами ООН из штаб-квартиры в Нью-Йорке.

Причины столь разнообразной национальной принадлежности профессиональных геохимиков сложны и разнообразны и нами анализироваться не будут. Однако прямым следствием этого является разный профессиональный подход и опыт людей, занятых в проектах ООН по геохимическим поискам. Каждый специалист имеет свой собственный подход к разрешаемым проблемам, и в начальный период это вызвало некоторые трудности при координации работ. Затем со временем разнообразие профессионального подхода стало преимуществом благодаря обмену опытом и во всех проектах ООН выработалась определенная согласованность. Неудобство действующей системы вызвано большой текучестью кадров, занятых в проектах, и трудностями, связанными с набором квалифицированных специалистов на сравнительно короткий срок (от одного до трех лет). Это компенсировалось попытками, обычно успешными, сохранить особо компетентных специалистов, переводя их после завершения предыдущих на новые проекты.

ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ И СТОИМОСТЬ РАБОТ

Производительность. *Детальная геохимическая съемка.* Трудно дать средние цифры производительности в полевых условиях, так как они сильно колеблются в зависимости от характера проекта. Это особенно касается детальной съемки, когда в день партия может взять от 20 до 100 проб, что зависит от двух основных факторов: рельефа местности и системы опробования.

Рекогносцировочная геохимическая съемка. При опробовании методом донных осадков коли-

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТ

чество проб, собираемых партией за день, колеблется от 3 до 15, т. е. составляет в среднем 10 проб (Эквадор, Гватемала). Рекогносцировочная съемка в Сенегале, включавшая опробование почв (сетка опробования 2000×500 м и 1000×500 м), также проводилась в среднем с производительностью 10 проб в день на партию.

Лабораторные работы. Цифры среднемесячной производительности полевых лабораторий, подсчитанные за один год, колеблются от 500 определений в случае небольших работ до 6 тыс. определений при полной программе. Эти результаты получены в сравнительно небольших и простых лабораториях, работы в которых проводит обычно химик ООН, а местные лаборанты помогают ему.

Учитывая трудности проведения проекта, довольно длительный подготовительный период, проблемы обучения местных специалистов и краткосрочность работ, вышеприведенные цифры можно считать достаточно высокими.

Стоимость работ. Общая стоимость рекогносцировочной геохимической съемки. Как уже говорилось, рекогносцировочная съемка составляет основную часть геохимических поисковых программ. Несмотря на разнообразие проектов, стоимость работ за единицу исследованной площади при рекогносцировочной съемке методом донных осадков колеблется в узких пределах — от 5 до 14 североамериканских долл. за 1 км^2 , т. е. в среднем 10 долл. Эти данные получены для проектов, в которых плотность опробования колебалась от 1 пробы на $0,5 \text{ км}^2$ до 1 пробы на 10 км^2 , что в среднем составляет 1 пробу на $1-2 \text{ км}^2$. Средняя стоимость работ за 1 км^2 в размере 10 долл. включает все полевые, лабораторные и камеральные расходы от проектирования до обработки данных, не считая расходов на содержание штаб-квартиры в Нью-Йорке.

Детальная съемка. В этом случае расходы на единицу площади прямо пропорциональны плотности опробования. Цифры колеблются в зависимости от проектов от 50 до 1000 долл. за 1 км^2 . Например, стоимость исследований в Сенегале, проведенных по сетке 100×200 м (т. е. 48 проб на 1 км^2), составила 175 долл. за 1 км^2 .

Лабораторные работы. Интересно выделить стоимость аналитических работ из общей стоимости исследований. К сожалению, эти сведения имеются лишь по немногим проектам. Стоимость одного определения, по имеющимся данным, колеблется от 50 центов до 1 долл. При этом обычно чем длительнее и обширнее геохимическая программа, тем меньше стоимость единицы лабораторных работ.

Малайзия (Сабах). С 1961 по 1965 г. в штате Сабах (северная часть острова Калимантан) были проведены комплексные изыскания, включавшие исследования в области гидрологии, лесоводства, почвоведения и поисковые геологические работы общей стоимостью около 1 660 тыс. долл.

Геологические поиски продолжались 2,5 года и были сосредоточены в долине реки Лабук. Геохимическое опробование донных отложений охватывало территорию площадью около 3500 км^2 , и велось в тяжелых условиях пересеченного рельефа, густого лесного покрова и плохой погоды. Работу планировал и направлял консультант-геохимик, а проводилась она под руководством геолога ООН. Район работ в основном сложен ультрабазитовыми интрузивными породами; обнаженность в районе плохая и геология изучена слабо.

Опробование донных отложений производилось главным образом из лодки. Интервал опробования составлял обычно 0,5 мили, а общая плотность опробования была около двух проб на 1 км^2 . Пробы анализировались на медь методом холодной вытяжки в полевых условиях, а на медь и никель — методом горячей вытяжки в центральной лаборатории в Джесселтоне. Результаты анализов на никель были отрицательны. Геохимический фон равнялся $10 \text{ млн}^{-1} \text{ Cu}$ при холодной вытяжке и $80 \text{ млн}^{-1} \text{ Cu}$ по валовому содержанию. Из 119 установленных геохимических аномалий меди 21 была выделена для последующего детального изучения, включающего почвенное опробование водоразделов, площадную съемку, проходку канав и шурфов.

Наиболее перспективная аномалия протяженностью 8 км по течению была обнаружена в верховьях реки Мамут, где с помощью анализов по методу холодной экстракции в пробах было выявлено повышенное содержание меди (в четыре раза выше фонового). Последующие работы позволили установить зону сульфидной минерализации площадью более 34 акров с содержанием меди в почве от 500 млн^{-1} до 6000 млн^{-1} . Геология района месторождения сложная: вмещающие горные породы сильно смяты в складки и разбиты разломами. Слабо метаморфизованные осадочные породы интродуцированы большими массами ультраосновных пород и небольшими телами порфиров и долеритов.

Дальнейшая работа Геологической службы Калимантана [2] привела к открытию медно-порфирового месторождения, и правительство готово принять предложения по детальной раз-

ведке и освоению месторождения. По общей оценке, запасы месторождения составляют около 100 млн. т руды при среднем содержании 0,7% Cu¹.

Панама. Как и в Малайзии, основой проекта в Панаме были геохимические поиски, которые проводились на полуострове Азойро с 1965 по 1968 г. на площади более 17 тыс. км². Этот район труден для исследований главным образом из-за неблагоприятных климатических условий (влажный тропический климат, до 200 дюймов осадков в год). Территория покрыта девственными лесами и фактически необитаема. Рекогносцировочная геохимическая съемка была признана лучшим методом поисковых исследований, и группой ООН, в которую входили геохимик, химик и консультант, была выполнена важная программа, в основном включавшая опробование донных отложений. Основное внимание было уделено северной части района, поскольку там были обнаружены отчетливые, хотя и не очень интенсивные аномалии тяжелых металлов и меди в донных отложениях, обнаруженные методом холодных вытяжек (содержание меди в пробах из аномалий 200—225 млн⁻¹ при фоновом содержании 80 млн⁻¹). Более детальное исследование донных осадков позволило выделить два участка (Ботиха и Петакуйлла) крупных медно-молибденовых геохимических аномалий (до 2000 млн⁻¹ меди и до 125 млн⁻¹ молибдена). Аномалии прослеживаются вниз по течению реки на 10 км (Ботиха) и 17 км (Петакуйлла).

Геология района определяется широким развитием андезитовых и базальтовых лав, относящихся, вероятно, к миоцену. Имеются также три более молодых интрузива, сложенные в основном кварцевыми монзонитами, гранодиоритами и дацитами. При детальных исследованиях были взяты пробы почв (анализы на медь, свинец, цинк, молибден), проведены геофизические исследования (магнитометрия, электромагнитная съемка) и пройдены скважины, которые вскрыли медно-порфировое оруденение и подтвердили наличие рудных тел, представляющих промышленный интерес. Правительство Панамы обратилось с предложениями об организации разведки месторождения и возможного его освоения. В результате этого открытия несколько горнодобывающих компаний уже начали исследовательские работы в других районах Панамы и по всей Центральной Америке.

¹ Право на эксплуатацию открытого месторождения получено компанией Мамут, организованной восьмью японскими горнорудными компаниями. Планируемая годовая производительность рудника 40 тыс. т меди в концентрате.—Прим. ред.

Прочие примеры. Работы в Малайзии и Панаме могут служить образцом успешных геологопоисковых программ, в которых геохимия сыграла главную роль. Приведем еще несколько проектов, в которых геохимия была одним из главных компонентов геологопоисковых работ.

Сенегал. Общие рекогносцировочные исследования с опробованием почв по сетке 200 × 500 м. Проблема латеритного покрова.

Соломоновы острова. Региональные рекогносцировочные геохимические поиски, проведенные с лодки вокруг островов, опробование донных отложений в устьях рек.

Чили. Детальные геохимические исследования зон гидротермального изменения пород.

Аргентина. Рекогносцировочные исследования на территории 130 тыс. км² в Андах с целью выбора районов для более детальных работ.

Сальвадор и Гватемала. Региональные рекогносцировочные поиски в районах, покрытых мощными четвертичными пострудными вулканическими породами. Опробование донных осадков и родников. Статистическая обработка геохимических данных.

Свазиленд. Рекогносцировочные с последующей детализацией поиски на золото; мышьяк и сурьма использовались как элементы-индикаторы в донных отложениях.

Кипр. Исследование первичных ореолов тяжелых металлов в вулканических породах в связи с месторождениями медноколчеданных руд. Полная математическая обработка данных¹.

ВЫВОДЫ

Из приведенного выше обзора ясно, что геохимические работы являются сейчас ключевым компонентом поисковых проектов ООН. Их развитие в последнее десятилетие было эффективно, как и достигнутые этими методами результаты. Однако большое разнообразие операций породило ряд проблем и среди них проблему регистрации, хранения и обработки все возрастающей массы данных. В настоящее время еще отсутствует единообразие в регистрации и оформлении полевых результатов, хотя и предпринимаются попытки к стандартизации

¹ В результате перечисленных поисковых проектов в Сенегале, Чили и Аргентине геохимическими поисками выявлены перспективные рудопроявления меди, а на Соломоновых островах — месторождение бокситов. Перечень неполный, в частности, не упомянуты проекты в Эквадоре, на Береге Слоновой Кости и в Мексике, также успешно закончившиеся открытием перспективных рудопроявлений, выявленных при помощи геохимических поисков (метод донных осадков).—Прим. ред.

в этой области. Огромное количество информации, собранной во всем мире, не должно быть потеряно в пыльных архивах. Ее следует записать в удобной форме на ЭВМ, чтобы она была доступна для дальнейшего использования.

Сейчас самое время взяться за эту задачу, пока не скопилась огромная по объему и не поддающаяся контролю цифровая информация, использование которой для повторных расчетов на ЭВМ чрезвычайно трудоемко. Это единственный путь обобщения и сопоставления

результатов работ по различным проектам и создания на этой основе поисковых признаков, применимых в региональных масштабах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hale W. E., Govett G. J. S., An Experiment in Mineral Exploration and Training in the Phillippines, CIM Bulletin, March 1968, 371—378, 1968.
2. Kirk H. J. C., Porphyry Copper Deposits in Northern Sabah, Malaysia, Trans. Inst. Min. and Met., 76, B 212—213, 1967.

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ГЕОХИМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ПОИСКОВ В КАНАДЕ

И. Никол

Управление
геологических исследований,
Королевский университет,
Кингстон, Онтарио, Канада

ВВЕДЕНИЕ

Проведение поисков месторождений вызывается нехваткой минерального сырья и необходимостью обнаружения новых рудопроявлений. Поиски могут проводиться и в ранее исследованных районах, но по новой методике или на новый вид минерального сырья. Кроме того, всегда существует возможность изучения рудоносности и совершенно нового района.

До сих пор геохимические поиски в Канаде в основном проводились в провинциях Британская Колумбия, Юкон и районе Мэритайм. В обширных районах древних щитов эти методы нашли ограниченное применение. В таких районах применение геохимических методов поисков часто связано с использованием специфической методики для решения специальных задач. Возможности применения геохимических методов в районах древних щитов зависят в значительной степени от природы четвертичной геологии.

Геохимия при поисках нашла наиболее широкое применение на площадях, где рыхлые отложения пользуются ограниченным развитием или являются остаточными. Местами ледниковые отложения, перекрывающие месторождения, перемещены на различные расстояния и это осложняет применение геохимических методов поисков. Оледенение может привести к перераспределению материала как в региональном, так и в локальном масштабах. Этот перенесенный материал в настоящее время представлен различными ледниковыми отложениями

и формами рельефа, пространственное расположение которых относительно источника различно.

Успешные поиски полезных ископаемых в районах развития ледниковых отложений более чем где-либо требуют точного применения специфических методов опробования и анализа, а также тщательной интерпретации данных в связи с более сложным взаимоотношением покровных и донных отложений с их первичным источником. Во многих случаях эти источники труднее определить, чем выявить геохимические аномалии, поэтому необходимы специальные методы.

ОПРОБОВАНИЕ

Геохимическое полевое опробование, будь то рекогносцировочные или детальные исследования, заключалось в отборе и анализе материала фракции минус 80 меш. Учитывая различное происхождение опробуемого материала, особенно в ледниковых отложениях, путем селективного опробования в ряде случаев было установлено, как можно получить наиболее надежную информацию.

Распределение обломков специфических минералов и горных пород в морене Мунро, простирающейся на 110 км и пересекающей золоторудный прииск Керкленд-Лейк, пространственно связано с определенными типами пород и минерализацией, встречающихся на пути морены [17]. Максимальная концентрация компонента была обнаружена на некотором расстоя-

нии от источника, вниз по морене. Величина перемещения, по-видимому, постоянна в каждой морене для материалов, имеющих общие гидрологические характеристики (размер, удельный вес и форму).

Связь расстояния сноса и размеров частиц может быть проиллюстрирована на примере из Финляндии, где рудные обломки образовали ясно видимый шлейф длиной до 5 км от никелевого сульфидного месторождения, в то время как аномалии никеля по фракции меньше 0,12 мм обладают более ограниченным развитием [16].

Последние исследования распределения материала в ледниковых отложениях, связанных с массивным медно-цинковым рудным телом в Лоувеме, недалеко от Валь-д'Ор, Квебек, показали резкое различие, существующее между содержанием меди и цинка в аномальных и фоновых участках по тяжелым фракциям классов минус 80 — плюс 230 меш по сравнению с классом минус 80 меш пробы в целом [7]. Аналогичное различие установлено для меди, свинца и цинка в тяжелой фракции классов плюс 80 меш по сравнению с фракцией минус 80 меш в глине донной морены того же района [10].

Медь, цинк и никель концентрировались в верхнем слое глины болотных профилей как в минерализованной, так и в фоновой областях местности, охваченной в восточной Канаде оледенением [9]. Данные наблюдения показывают, что там, где подобные условия преобладают, опробование этого горизонта может оказаться полезным при рекогносцировочных поисках.

Приведенные выше примеры говорят о том, что при внимательном подходе методы геохимических исследований могут быть успешно использованы в районах перемещенных покровов. Учитывая сложность происхождения ледниковых отложений, следует обратить внимание на разработку соответствующей методики опробования на основании местных условий и специфических задач исследований. В исследованиях подобного типа понимание истории формирования ледниковых отложений является ключом к успешному использованию геохимических методов поисков.

АНАЛИЗ ПРОБ

Различные методы холодной экстракции металлов и их сумм нашли довольно широкое применение при геохимических поисках как методы извлечения металлов, содержащихся в различных химических и минеральных формах. Хорошо известны методы, позволяющие определять содержание меди, цинка, а также суммы

тяжелых металлов, легко извлекаемых из продуктов окисления сульфидных месторождений.

В ряде районов, включая Батерст — Джекет-Ривер, Нью-Брансуик [2], отмечена ассоциация аномально высоких содержаний металлов в донных осадках, вызванная осаждающим действием окисей марганца и гелей. Подобные наблюдения были сделаны в Великобритании, где обнаружены повышенные содержания кобальта и цинка с заметно повышенными уровнями марганца в донных осадках водотоков, дренирующих слабопромытые кислые почвы [19]. В последнем случае обнаружение легко восстанавливающегося и вступающего в обменные реакции марганца путем использования ацетата аммония оказалось эффективным при определении источника высоких концентраций марганца и, следовательно, возможного значения аномальных концентраций ассоциирующих с ним металлов.

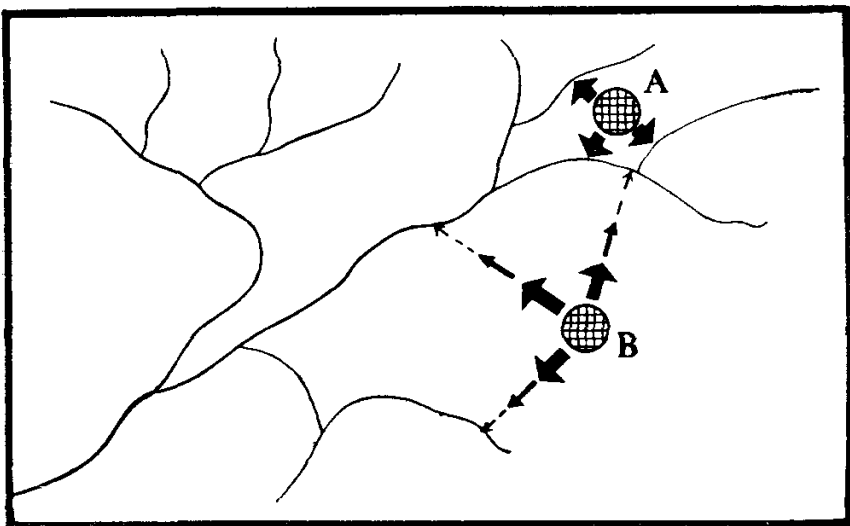
Данные о содержании ртути в различных минеральных фазах проб могут быть получены путем непрерывного определения ртути, выделяющейся при нагревании образца [20]. По мере нагревания различные ртутьсодержащие минералы разлагаются при разных температурах и освобождают содержащуюся в них ртуть.

Предварительные результаты изучения влияния различных кислотных вытяжек на обычные пороодообразующие минералы подтвердили, что разные количества металла, содержащегося в минерале, извлекаются с помощью разных реагентов [5].

Учитывая изменения содержаний компонентов проб, следует рекомендовать тщательный подбор специальных экстрагирующих реагентов в каждом отдельном случае, позволяющих отличить аномалии, связанные с оруденением, от аномалий, имеющих другой источник и не представляющих промышленного интереса.

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

При интерпретации геохимических данных основная задача состоит в определении существенно аномальных содержаний металлов, связанных с оруденением. В том случае, когда рассматриваются результаты опробования донных осадков, аномальные концентрации металлов в которых обусловлены оруденением, примыкающим к гидрографической сети, и четко прослеживаются, определение аномалий очевидно (фиг. 1, А). На участках с менее густой гидросетью, когда оруденение может быть более удалено от дренирующих рек или ручьев, а следовательно, аномалии более слабые, их ин-



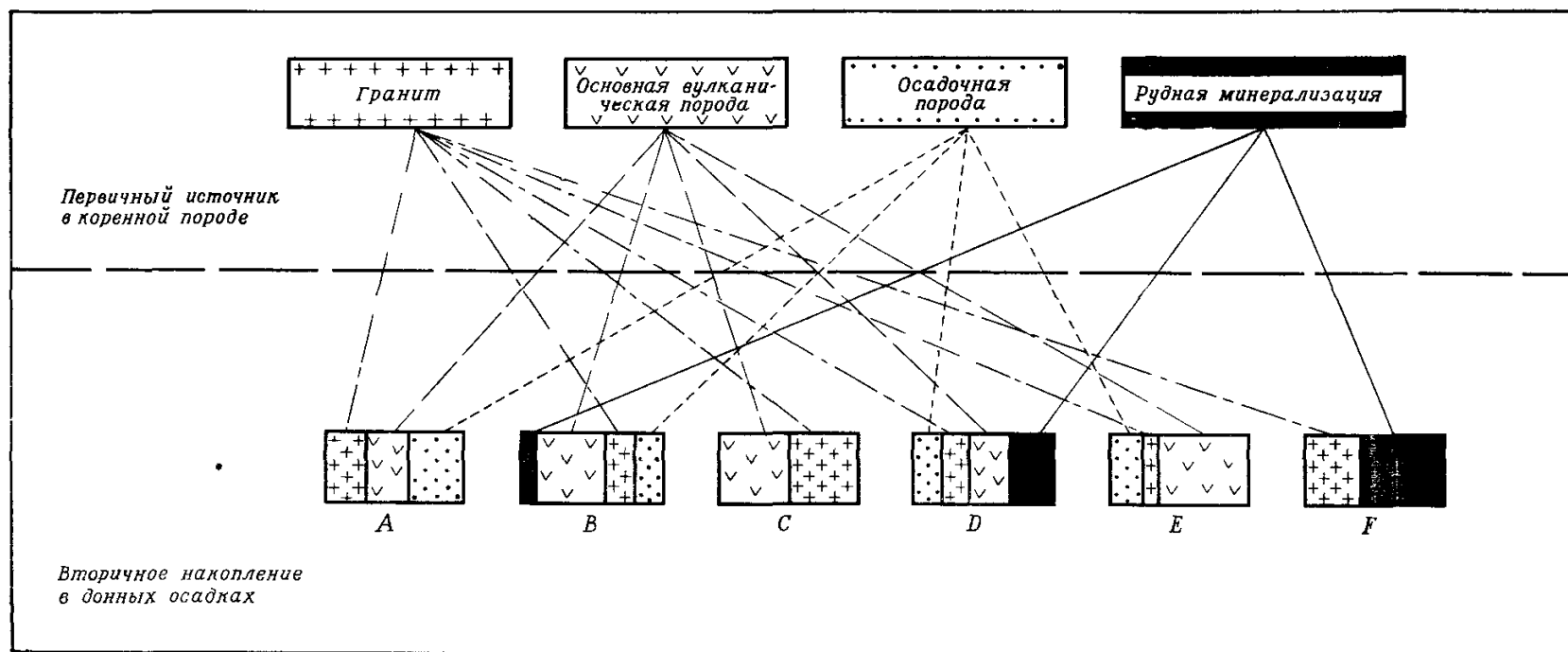
ФИГ. 1. Изменение протяженности аномалии в зависимости от удаленности рудной минерализации от гидрографической сети.

терпретация менее определена (фиг. 1, B). Различные типы пород и руд характеризуются определенным содержанием металла и присущими им ассоциациями; при этом металлы в результате выветривания, эрозии и рассеяния входят в различных сочетаниях в перекрывающие рыхлые отложения и донные осадки. Поскольку проба донных осадков состоит из материала осадков, залегающих выше точки пробоотбора, она по-разному будет отражать состав различных источников, к которым относятся коренные породы, оруденение и, возможно, окружающая среда. Идеализированное представление о взаимоотношениях компонентов, входящих в состав донных осадков и различных типов коренных пород и руд, представлено на фиг. 2. Большая часть пробы F имеет своим

источником оруденение, а следовательно, при нормальном стечении обстоятельств эту пробу довольно легко определить как аномальную. Компонент оруденения в пробах D и B содержит металл, внесенный из зоны рудной минерализации и различных горных пород района. Поэтому признание факта, что пробы D и B содержат металл, внесенный из зоны рудной минерализации, менее вероятно, хотя рудная минерализация, повлиявшая на состав проб D и B, может иметь такое же значение, как и то, что определяет состав аномальной пробы F. Поэтому возможность различать источники металла в донных осадках с максимально возможной степенью достоверности имеет важное значение.

Для решения проблем интерпретации геохимических данных применялись различные методы. Чтобы выявить закономерности при изменениях среднего содержания, использовались методы построения поверхности тренда и анализа функции среднего с помощью скользящего окна. Когда данные включали много переменных, различное применение нашли кластер-анализ и методы факторного и дискриминантных анализов в зависимости от природы интерпретационной проблемы. Во многих случаях применение этих методов имело целью интерпретацию данных; дальнейшие исследования с использованием ЭВМ при интерпретации геохимической информации полностью оправдали их.

Факторный анализ — метод определения взаимосвязей признаков или наблюдений (содержаний или проб) в совокупности сложных на первый взгляд данных, причем переменные группируются в ассоциации на основе коэффи-



ФИГ. 2. Изменение соотношения состава донных осадков и их первичных источников.

циентов их взаимной корреляции. По этим ассоциациям можно выявить затем свойства, которые неопределимы при визуальном исследовании. Например, факторный анализ многоэлементных данных по донным осадкам из минерализованного сланцевого пояса в Сьерра-Леоне показал, что распределение мышьяка в донных осадках связано с высокими фоновыми концентрациями этого элемента в ультрабазитовых кристаллических сланцах, а также с золотым оруденением [8]. Это дало возможность выделить участки, где мышьяк явно связан с оруденением. Факторный анализ данных по большому количеству элементов, полученных при геохимическом исследовании на площади 200 тыс. км² в Замбии, позволил представить данные в виде преобладающих ассоциаций металлов и объяснить их образование точнее, чем по картам отдельных элементов [1].

Ниже описываются предварительные результаты факторного анализа материалов рекогносцировочных исследований донных осадков в районе Батерст — Джекет-Ривер, Нью-Брансуик. Более подробные сведения о результатах этих исследований читатель может получить в работе Бойла и др. [2].

Участок, подстилаемый палеозойскими осадочными породами и гранитными интрузиями, характеризуется оруденением различного типа, в том числе массивными сульфидными залежами, медно-свинцово-цинково-мышьяковыми и серебряными жильными образованиями и в меньшей степени проявлениями молибдена, марганца и железа. Геохимические исследования были основаны на сборе проб воды и донных осадков с интервалами 450 м по ручьям и рекам. Пробы донных осадков анализировались методами вытяжек тяжелых металлов на Pb, Zn, Cu, Sb, As, Mo, Sn, W, Ag, Ni, Co, Cr, Ba, Mn, а вода — на сумму валовых содержаний металлов. Распределение металлов, кроме кобальта и хрома, опубликовано в виде серии карт [2]. Распределение микроэлементов выявило в районе исследований ряд ассоциаций, явно связанных с оруденением, типом подстилающих пород и окружающей средой. Наиболее тесные ассоциации можно легко определить при визуальном исследовании данных. Однако оказалось, что с помощью факторного анализа можно обнаружить и менее явные ассоциации, а кроме того, обратить внимание на случаи, где ассоциации имеются, но очень слабые, поэтому их не удастся определить при визуальном исследовании данных.

Из опубликованных карт были извлечены данные по 713 пробам, которые отбирались случайно с плотностью опробования 1 проба

на 1 кв. милю. Не предпринималось попыток ограничить опробование определенными размерами площади водосбора и пробы брались как из второстепенных притоков, так и основных ручьев. Кроме подсчета общих средних содержаний металла, определялись средние содержания донных осадков различных геологических формаций по пробам, взятым из осадков русел, дренирующих породы одного типа (фиг. 3). Очевидно, что определенные породы характеризуются различными группами элементов. Толща аргиллитов, сланцев и кварцитов ордовика характеризуется донными осадками с содержанием Zn, As, Cu, Pb, Ni выше нормального, основные вулканические породы девонского возраста — повышенным содержанием Zn, Ag, Ba, Ni, а кислые интрузивы — более высоким содержанием Mo. Разница между самым высоким и самым низким средним содержанием в различных типах пород часто не более чем в два-три раза, а во многих случаях общее среднее содержание близко к пределу чувствительности анализа. Необходимо соблюдать осторожность при интерпретации небольших различий средних значений, которые могут возникнуть в связи с невысокой точностью данных на уровне определений, близких к пределу чувствительности анализа. Была использована программа [6] для R-метода факторного анализа в модификации Королевского университета для ЭВМ IBM 360-50. Основные стадии процесса описаны ранее [8].

Ввиду того что данные распределены логнормально, были использованы их логарифмы. Взаимосвязи переменных устанавливались путем вычисления коэффициентов корреляции между каждой парой переменных (методом произведения моментов), при этом использовалось 713 проб (фиг. 4). Цинк положительно коррелирует с суммой тяжелых металлов в осадках и с Pb — As — Cu — Ni — Mn и Ba; Ag — с Pb и слабо — с Cu — Zn и As; Mn — с As — Ba — Ni — Zn и слабо — с суммой тяжелых металлов в донных осадках; Cu — с Zn — Ni и в меньшей степени — с суммой тяжелых металлов в донных осадках, а также с Pb — Sb — Ba — Ag — Mo и As; Sb — слабо с Cu. Сумма тяжелых металлов в водах и W не зависит по существу ни от каких ассоциаций. Общий уровень значимости коэффициентов корреляции несколько ниже, чем полученный в предыдущих исследованиях. Возможно, это объясняется содержаниями ряда элементов, близкими к пределу чувствительности методов анализа, а возможно, разными методами, что приводило к повышению случайных ошибок. Но, несмотря на это, корреляция существенна.

Факторы, необходимые для выявления ха-

	All data		ORDOVICIAN					SILURIAN		DEVONIAN			CARB.			
	Contrast		Acid volcanics	Augen schists	Basic volcanics	Sediments	Elmtree Grp.	Basic intrusives	Sediments	Volcanics	Sediments	Basic volcanics	Basic intrusives	Acid intrusive	Bathurst seds.	Bonaventure seds.
Mn	1620	3		●	⊙	⊙							○	○	○	
Ni	34	4		○	⊙	⊙					●	⊙	○	○	⊙	
Cu	11	2		○	⊙	⊙							○	○	○	
Zn	120	3				⊙	●				●	●	○	○	○	
As	3	13		○		⊙						●	○	○	○	
Mo	1.5	5			⊙								●		⊙	
Ag	3	2									●					
Ba	400	2					○			⊙	●	○	○		⊙	
Sb	3	2		⊙		⊙				○					●	
W	2	1														
Pb	18	5				⊙	○	○	○			●	○	○	○	
Cx HM SS	3	2		●			○	○				○	○		○	
HMW	<001	3					●	○								
n	713		21	9	26	40	16	7	55	26	17	18	2	10	24	2
ASSOCIATION				Cu cxHMSS Mn Sb As	Ag Cu Mn	Ni Mn Cu Sb	Zn Cu Ni Pb As	HMW Ba Pb cx HMSS	Pb		Ni Ba Sb	Zn Ag Ba Ni	Zn As Pb Cu Ba cxHMSS	Mo Mn Ni Cu Zn Ba Pb cxHMSS	Mn Zn Pb	Sb Ni Mn Ba Mn cx HMSS

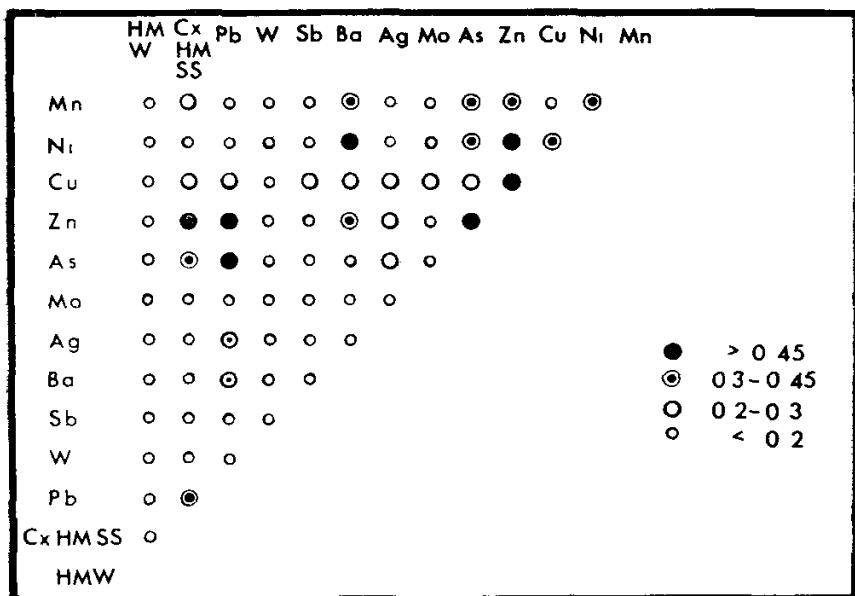
KEY
 ● High cont
 ⊙
 ○ Lowme conte

ФИГ. 3. Средние содержания микроэлементов в донных осадках, ассоциирующих с различными типами пород. Cx HMSS — сумма тяжелых металлов в донных осадках, HMW — сумма тяжелых металлов в водах.

рактика изменчивости исходных данных, определяются из корреляционной матрицы. Обрабатываемая корреляционная матрица имеет единицы на своей главной диагонали. Точнее говоря, программа осуществляет анализ главных компонентов, а не факторный анализ [5, 3]. Геометрическая интерпретация методов сводится к тому, что факторы (главные компоненты) можно считать ортогональными осями, вокруг которых группируются многомерные наблюдения. Доля общей дисперсии, вкладываемая каждым фактором, выражается величиной собственного значения, которое вычисляется согласно стандартной методике матричной алгеб-

ры. Полученные факторы располагают в порядке убывания важности соответственно убыванию их дисперсий, которые определяются величинами соответствующих им собственных значений. Выбор числа используемых факторов субъективен. Харман [11] предлагал использовать только факторы, связанные с собственными значениями, которые больше единицы. Другие авторы рекомендовали, если есть отчетливый разрыв в порядке понижения собственных значений, использовать только факторы, ассоциирующие с собственными значениями над разрывом.

Вклад, или вес, каждого элемента в каждый фактор определяется из собственных векторов,



ФИГ. 4. Корреляционная матрица содержаний микроэлементов в донных осадках и водах.

вычисленных совместно с собственными значениями на предыдущем этапе. Однако веса на этой стадии часто математически ориентированы и их трудно интерпретировать, поэтому выполняются две следующие стадии модификации. Сначала ортогональные оси поворачивают вокруг исходного пункта таким образом, чтобы разница весов по каждому фактору была максимальной. Процесс, известный как ортогональное вращение методом изменения максимума (Varimax), имеет эффект очищения каждого фактора, что облегчает интерпретацию [14]. Поскольку процессы в природе редко взаимно исключают один другой, всегда можно ожидать некоторую корреляцию между факторами; поэтому ортогональные оси путем вращения приводятся к косоугольному решению, при котором факторы уже коррелируются. Эта операция выполняется методом деортогонализирующего вращения (Promax) [13].

Следует подчеркнуть, что выбор модели должен основываться на геологических соображениях. Учет геологии и минерализации района, а также влияния окружающей среды привел к тому, что значимыми оказались ассоциации элементов, полученные по модели из семи факторов (фиг. 5). Такая модель учитывает только 77% общей дисперсии исходных данных, оставляя значительную долю их изменчивости необъясненной (табл. I). При рассмотрении групп наблюдений, представляющих собой измерения в пространстве, в котором учтена полная дисперсия переменных, оказалось, что объяснимо более 85% изменчивости легкоизвлекаемых тяжелых металлов, Sb, W и суммы тяжелых металлов в водах (табл. II). В эту модель включены As, Cu, Mn и Pb с относительно малыми дисперсиями. В модели из семи факторов Zn и Mo встре-

Factor	Factor Model				
	3	4	5	6	7
1	N Zn Ba Mn As Cu	Ni Ba Zn Mn As Cu Pb	HMW HMSS Pb Zn As	Ag Cu Pb	HMSS Zn Pb As Mn
2	Ag Pb HMW Sb Zn	HMW HMSS Pb Zn As	Ni Ba Zn Mn Cu As	Ni Ba Zn Cu As Pb	Ni Ba Zn Mn Cu As
3	Mo W Mn	Mo W Mn	Mo Mn Sb As	Mo Mn As	Mo Mn As
4		Sb Ag Cu	Sb Ag Cu	Sb Cu	Sb
5			W	W	W
6				HMSS HMW Zn Pb	Ag Cu Pb Zn
7					HMW

ФИГ. 5. Ассоциации металлов различных факторных моделей по содержаниям микроэлементов в донных осадках.

чаются в трех ассоциациях, а As, Cu и Pb — в двух, что свидетельствует о связи распределения этих элементов с рядом источников.

Пространство, в котором различные ассоциации элементов представлены отдельными точками (наблюдениями), — это пространство факторов. Последние вычисления выполнены

Таблица I

Собственные значения и общность факторов

Номера факторов	Собственные значения	Общность, %	
		Фактор	Общая
1	3,682	28,3	28,3
2	1,506	11,6	39,9
3	1,216	9,4	49,3
4	1,053	8,1	57,4
5	0,942	7,2	64,6
6	0,853	6,6	71,2
7	0,766	5,9	77,0
8	0,643	4,9	82,0
9	0,625	4,8	86,8
10	0,540	4,2	91,0
11	0,489	3,8	94,7
12	0,424	3,3	98,0
13	0,262	2,0	100,0

Таблица II

Общности элементов в различных факторных моделях

	Факторная модель									
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
сх HMSS ¹	0,45	0,45	0,73	0,27	0,91	0,96	0,96	0,97	0,97	1,00
HMW ²	0,61	0,62	0,63	0,99	0,99	0,99	0,99	1,00	1,00	1,00
Ag	0,51	0,63	0,77	0,77	0,78	0,94	0,99	0,99	1,00	1,00
As	0,52	0,52	0,57	0,60	0,67	0,74	0,74	0,95	1,00	1,00
Ba	0,56	0,56	0,56	0,67	0,67	0,86	0,95	0,95	1,00	1,00
Cu	0,55	0,58	0,58	0,58	0,88	0,93	0,95	0,95	1,00	1,00
Mn	0,53	0,67	0,67	0,67	0,68	0,69	0,93	0,99	1,00	1,00
Mo	0,63	0,69	0,82	0,83	0,95	0,95	0,97	0,97	1,00	1,00
Ni	0,72	0,73	0,75	0,77	0,77	0,79	0,80	0,80	0,94	1,00
Pb	0,58	0,58	0,59	0,60	0,64	0,67	0,78	0,97	0,99	1,00
Sb	0,68	0,73	0,90	0,93	0,98	0,99	0,99	0,99	1,00	1,00
W	0,37	0,88	0,93	0,97	0,98	0,98	0,99	1,00	1,00	1,00
Zn	0,76	0,76	0,77	0,77	0,77	0,77	0,78	0,78	0,85	1,00

¹ Сумма тяжелых металлов в донных осадках² Сумма тяжелых металлов в водах

Таблица III

Сравнение средних содержаний рассеянных элементов (млн⁻¹) с факторной нагрузкой элемента и значением фактора

	Факторная нагрузка	Значение фактора									
		> 3	2-3	1,5-2	1-1,5	0,5-1	0-0,5	-0,5-0	-1-0,5	-1,5-1,0	-1,5
HMSS ¹	0,9	19	15	10	8	5	3	2	2	2	2
Zn	0,6	7500	500	300	190	180	190	64	70	70	20
Pb	0,5	750	1100	40	35	34	19	13	11	11	10
As	0,4	1400	35	18	12	16	7	2	1	1	1
Mn	0,3	7500	5000	4000	3800	5500	3800	1100	2800	2800	300
n		4	7	8	8	7	8	8	7	7	1

¹ Сумма тяжелых металлов в донных осадках

Таблица IV

Сравнение средних содержаний рассеянных элементов (млн⁻¹) с факторной нагрузкой элемента и значением фактора

	Факторная нагрузка	Значение фактора									
		> 3	2-3	1,5-2	1-1,5	0,5-1	0-0,5	-0,5-0	-1,0-0,5	-1,5-1,0	-2-1,5
Ni	0,8	15	18	19	17	21	28	55	60	65	120
Ba	0,8	200	190	145	210	260	450	525	650	710	790
Mn	0,5	4000	1050	850	900	1000	2400	5000	4000	6500	13 000
Zn	0,5	60	100	75	65	110	95	175	175	215	300
Cu	0,4	9	120	25	9	10	9	19	14	25	35
As	0,4	2	1	1	2	2	4	16	42	12	20
n		5	7	7	8	8	8	8	8	8	7

Таблица V

Сравнение средних содержаний рассеянных элементов (млн⁻¹) с факторной нагрузкой элемента и значением фактора

	Факторная нагрузка	Значение фактора									
		> 3	2-3	1,5-2	1-1,5	0,5-1,0	0-0,5	-0,5-0	-1-0,5	-1,5-1	-2-1,5
Ag	0,9	7	4	0,6	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Cu	0,5	30	23	40	25	22	16	14	8	10	3
Pb	0,4	100	26	55	52	30	35	14	23	10	8
Zn	0,3	600	200	190	270	250	180	115	105	95	175
n		5	6	5	5	7	8	8	8	7	4

по методике, предложенной Кайзером [15], и дают нам идеальные, как назвал их Харман [11], признаки, получаемые согласно методу деортогонализирующего вращения матрицы (Promax) по исходным данным, преобразованным логарифмической функцией. Эти признаки (значения факторов) имеют единичные дисперсии и нулевые средние значения. Исследования изменчивости содержания микроэлементов с помощью факторных значений в таких ассоциациях, как легкоизвлекаемая сумма тяжелых металлов — Zn — Pb — As и Mn, Ni — Ba — Mn — Zn — Cu, As, Ag — Cu — Pb и Zn, показали, что содержания отдельных металлов колеблются в общих чертах синхронно с колебаниями значений факторов (табл. III—V).

На этой стадии преждевременно давать надежную оценку значения ассоциаций металлов, обнаруженных путем факторного анализа, что может быть осуществлено только при дальнейших исследованиях, включая полевые. Из информации, получаемой при опробовании площади, по-видимому, можно было бы заключить, что такие факторы, как сумма тяжелых металлов Zn — Pb — As и Mn, Ag — Cu — Pb и Zn, Sb и W, скорее отражают геологию и оруденение, тогда как ассоциации Ni — Ba — Zn и Cu и Mo — Mn и As обусловлены взаимодействием геологии, оруденения и процессов рассеяния элементов в окружающей среде.

Карты значений самих факторов наглядно изображают пространство, в котором различные ассоциации элементов представляются отдельными точками. Если распределение Zn имеет отношение к трем ассоциациям, то на картах соответствующих трех факторов эти три ассоциации будут представлены различными замерами. Таким путем цинк будет разделен на три ассоциации, связанные с различными источниками. Возможно, это привлечет внимание к пробам, которые содержат небольшие, но важные компоненты особых ассоциаций и которые не

были определены из-за влияния других, более значительных ассоциаций.

Планируется осуществить факторный анализ полных данных всех 3500 проб и исследовать в полевых условиях значение сети отбора проб.

Хотя возможному значению факторного анализа было уделено много внимания при интерпретации данных по большому количеству элементов, все же метод имеет некоторые недостатки. Метод выделяет ряд факторов, действующих в данном районе. Если район сложный, т. е. неоднородный в геохимическом отношении, может оказаться, что на переменные действует гораздо больше факторов, чем может охватить факторный анализ. Следует подчеркнуть, что особое внимание следует уделять выбору оптимального метода интерпретации, имея в виду конкретную геологическую задачу.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проблемы, стоящие перед геохимическими поисками, в Канаде связаны главным образом с ледниковой историей. Геохимические поиски, проведенные в районе ледниковых отложений, показали, что путем внимательного выбора и усовершенствования методов опробования можно достичь значительного улучшения эффективности исследований. Понимание ледниковой истории является необходимым условием успешного применения геохимических методов поисков в районах развития ледниковых отложений.

Учитывая смешанный характер ледниковых отложений, более ценную информацию, видимо, можно получить при более строгом выборе оптимальной аналитической методики, с помощью которой удастся определить металл, содержащийся в особых минеральных фазах пробы.

Интерпретация геохимических данных является по существу процессом субъективным.

Хотя во многих случаях нет более ценного качества, чем личный опыт, избранная методика обработки данных на ЭВМ в определенных случаях позволила разобраться в существовании геохимических данных и получить важную информацию, которую нельзя обнаружить при визуальной интерпретации геохимических данных. Поэтому в заключение следует сказать, что ввиду особенностей проблем исследований для успешного применения геохимических методов поисков в Канаде следует обратить внимание на разработку соответствующих методов опробования, анализа и интерпретации данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Armour-Brown A., Nichol I.*, Regional Geochemical Reconnaissance and the Location of Metallogenic Provinces, *Econ. Geol.*, 64, № 3, 312—330, 1970.
2. *Boyle R. W., Tupper W. M., Lynch J., Friedrich G., Ziauddin M., Shafiqullah M., Carter M., Bygrave K.*, Geochemistry of Pb, Zn, Cu, As, Sb, Mo, Sn, W, Ag, Ni, Co, Cr, Ba and Mn in the Waters and Stream Sediments of the Bathurst — Jacquet River District, New Brunswick, *Geol. Surv. Canada, Paper 65—42*, 50, 1966.
3. *Cameron E. M.*, A Computer Program for Factor Analysis of Geochemical and Other Data, *Geol. Surv. of Canada, Paper 67—34*, 42, 1967.
4. *Cattell R. B.*, Factor Analysis, An Introduction to Essentials, Part 1 — The purpose and underlying models, *Biometrics*, 21, 190—215, 1965.
5. *Foster J. R.*, Analytical Requirements in Geochemical Exploration, *Abs.*, 3rd Internat. Geochem. Expln. Symp., Toronto, 1970.
6. *Garrett R. G.*, Two Programs for the Factor Analysis of Geologic and Remote Sensing Data, Northwestern University, Rept. 12, 98 (prepared for N.A.S.A. under Grant NGR 14-0077-027), 1967.
7. *Garrett R. G.*, The Dispersion of Copper and Zinc in Glacial Overburden at the Louvem Deposit, Val d'Or, Quebec, *Abs.*, 3rd Internat. Geochem. Expln. Symp., Toronto, 1970.
8. *Garrett R. G., Nichol I.*, Factor Analysis as an Aid in the Interpretation of Regional Geochemical Stream-Sediment Data, *Intern. Geochem. Expln. Symp.*, *Quart. Colo. Scholl Mines*, 64, № 1, 1969, 245—264, 1968.
9. *Gleeson C. F., Coope J. A.*, Some Observations on the Distribution of Metals in Swamps in Eastern Canada, *Proc. Symp. Geochem. Prosp.*, Ottawa, *Geol. Surv. Canada, Paper 66—54*, 145—166, 1966.
10. *Gleeson C. F., Cormier R.*, Evaluation by Geochemistry of Geophysical Anomalies and Geological Targets Using Overburden Sampling at Depth, *Abs.*, 3rd Internat. Geochem. Expl. Symp., Toronto, 1970.
11. *Harman H., H.*, Modern Factor Analysis, Chicago Univ. Press, 2nd Edition, 474, 1967.
12. *Horsnail R. F., Nichol I., Webb J. S.*, Influence of Variations in Secondary Environment on the Metal Content of Drainage Sediments, *Internat. Geochem. Expln. Symp.*, *Quart. Colo. School Mines*, 64, № 1, 307—322, 1968.
13. *Hurley J. R., Cattell R. B.*, The Procrustes Program: producing direct rotation to test a hypothesized factor structure. *Behav. Sci.*, 7, 258—262, 1962.
14. *Kaiser H. F.*, The Varimax Criteria for Analytical Rotation in Factor Analysis, *Psych.*, 23, 187—200, 1958.
15. *Kaiser H. F.*, Formulas for Component Scores, *Psych.*, 27, 83—87, 1962.
16. *Kauranne L. K.*, Pedogeochemical Prospecting in Glaciated Terrain, Finland, *Comm. Geol., Bull.* № 184, 10, 1959.
17. *Lee H. A.*, Investigation of Eskers for Mineral Exploration, *Geol. Surv. Canada, Paper 65—14*, 1965.
18. *Nichol I., Garrett R. G., Webb J. S.*, The Role of Some Statistical and Mathematical Methods in the Interpretation of Regional Geochemical Data, *Econ. Geol.*, 64, 204—220, 1969.
19. *Nichol I., Horsnail R. E., Webb J. S.*, Geochemical Patterns in Stream Sediment Related to Precipitation of Manganese Oxides, *Trans. Inst. Min. Metall.*, 76, 113—115, 1967.
20. *Walker J. L., Bradshaw P. M. D.*, Summary of Research and Development in Geochemical Exploration in Canada, *Abs.*, 3rd Internat. Geochem. Expln. Symp., Toronto, 1970.

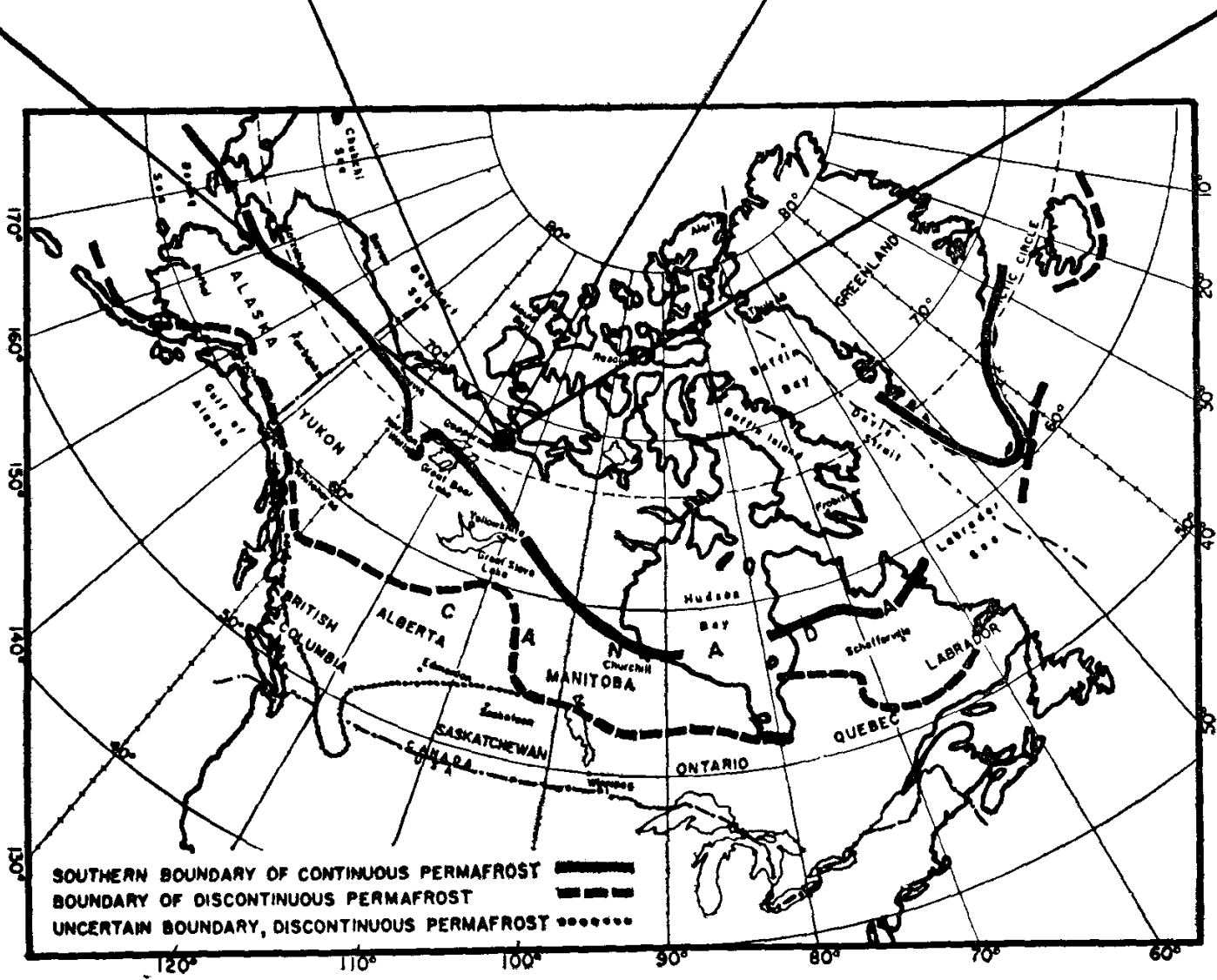
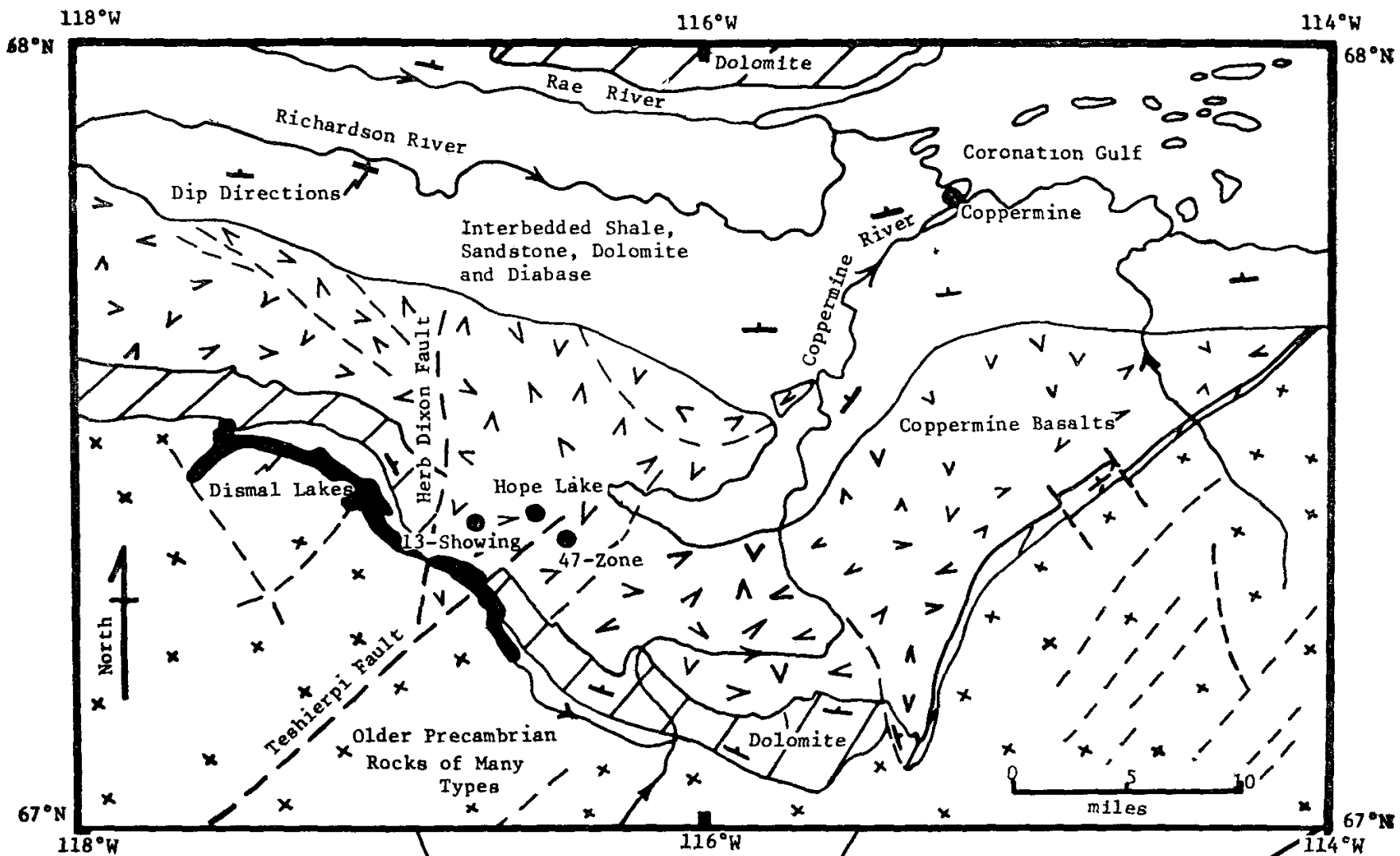
ОЦЕНОЧНЫЕ ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В РАЙОНЕ МНОГОЛЕТНЕЙ МЕРЗЛОТЫ, СЕВЕРО-ЗАПАДНЫЕ ТЕРРИТОРИИ, КАНАДА

Р. Дж. Аллан,
Е. Х. У. Хорнбрук
Геологическая служба Канады,
Оттава

ВВЕДЕНИЕ

Геохимические методы поисков и сбор геохимических данных в районах развития сплошной и прерывистой многолетней мерзлоты Северной Америки в прошлом совершенно не производились. Инициатором программы исследований стала Геологическая служба Канады в 1969 г. [18], имевшая перед собой цель разра-

ботать методику геохимических исследований для районов многолетней мерзлоты. В этой статье описываются результаты предварительных исследований, заключающихся в сборе, подготовке и анализе проб почв, донных осадков, материала морозных вздутий, растительности и вод поблизости от озера Хоп, бассейн реки Коппермайн, Северо-Западные территории (фиг. 1). Исследовались два основных участка,



ФИГ. 1.

Вверху помещена геологическая карта района озера Хоп. Внизу — карта распространения многолетней мерзлоты в Канаде. Сплошная линия — южная граница сплошной многолетней мерзлоты; пунктир — неопределенная граница прерывистой многолетней мерзлоты, штрих-пунктир — граница прерывистой многолетней мерзлоты.

зона 47 и рудопроявление 13. Оба минерализованных медью рудопроявления находятся на участках, принадлежащих компании «Коппермайн-Ривер». Геохимические исследования охватывали район базальтового пояса Коппермайн, наиболее перспективный среди других районов многолетней мерзлоты.

Озеро Хоп расположено в 580 км к северу от Йеллоунайфа и в 60 км к юго-западу от деревни Коппермайн на арктическом побережье. Летом с районом озера Хоп имеется воздушное сообщение из Йеллоунайфа; перевозка необходимых грузов может обеспечиваться зимней дорогой. Район озера Хоп был выбран из-за наличия здесь зоны 47, единственного промышленного рудного тела в давно известных [24] базальтах группы Коппермайн-Ривер с богатой медной минерализацией. Холодная пустыня района Коппермайн лежит в зоне сплошной многолетней мерзлоты. Исследовалось также рудопроявление 13, которое представляет собой тип минерализации, противоположной брекчиевым рудам. Кроме того, почвенный разрез здесь представлен более полно по сравнению с участком зоны 47.

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ГЕОХИМИЧЕСКИХ ПОИСКОВ В УСЛОВИЯХ МНОГОЛЕТНЕЙ МЕРЗЛОТЫ

Многолетняя мерзлота в Канаде образуется исключительно из-за температурных условий и теплового состояния материала почвы и пород, когда их температура непрерывно в течение многих лет остается ниже 0°C. Многолетняя мерзлота занимает около 50% поверхности территории Канады. Сюда входят большая часть Юкона, Северо-Западные территории и все Арктические острова. Таким образом, в районе многолетней мерзлоты расположена большая часть Канадского щита и его неизвестные минеральные ресурсы.

В Канаде выделены две зоны многолетней мерзлоты [12]: сплошная мерзлота и прерывистая (островная) мерзлота. В зоне сплошной мерзлоты многолетняя мерзлота встречается на любой глубине. Но как на Аляске [10], так и в Канаде [11] в этой зоне под мелкими озерами и крупными реками было обнаружено до нескольких десятков метров талого грунта; таким образом, даже в зонах сплошной мерзлоты в районах с многочисленными реками и озерами типа Канадского щита многолетняя мерзлота может оказаться прерывистой. Вполне вероятно также, что многолетняя мерзлота полностью вытаяла под более крупными (300 м в диаметре) озерами, создав сквозную связь оттаив-

шего грунта между соседними озерами и реками. В зонах прерывистой мерзлоты многолетняя мерзлота обнаруживается вокруг «островков», не замерзших на глубине.

Глубина летнего оттаивания поверхностного слоя в зоне многолетней мерзлоты регулируется целым рядом факторов, в том числе растительным покровом, структурой почвенного слоя, рельефом и др. Участки, сложенные крупным гравием, оттаивают на большую глубину, чем мелкозернистые материалы, и во многих случаях крупнозернистые отложения «сухие», т. е. льда в них не видно, хотя температура постоянно ниже 0°C. Понимание факторов, влияющих на глубину таяния, распределение оттаявших зон среди многолетней мерзлоты и, следовательно, существование зон, подверженных процессам выщелачивания, может иметь большое значение при интерпретации степени и распространенности геохимических ореолов рассеяния, образования которых можно ожидать в определенных местах.

ПРЕЖНИЕ ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ПОИСКИ В РАЙОНАХ МНОГОЛЕТНЕЙ МЕРЗЛОТЫ СЕВЕРНОЙ АМЕРИКИ

Насколько нам известно, геохимические поиски в районах сплошной многолетней мерзлоты Северной Америки не проводились, если не считать геохимических исследований силами небольших компаний в Северо-Западных территориях. Даже в зоне прерывистой многолетней мерзлоты в Канаде, в Кено-Хилл — Галена-Хилл [5, 6, 7, 8, 9] и Казино [2] проводились лишь небольшие по масштабам геохимические исследования. Эти районы Юкона охвачены оледенением лишь в слабой степени. В районе островной многолетней мерзлоты южной и центральной Аляски, к счастью тоже почти не охваченном оледенением, исследовались донные осадки вдоль дорог [15, 16]. В СССР геохимические поиски в зоне многолетней мерзлоты проводились в течение нескольких лет [22, 23].

Слабое развитие геохимических исследований в зонах многолетней мерзлоты Канады противоречит тому факту, что многолетней мерзлотой занято почти 50% территории (площадь большая, чем в любой другой стране, кроме СССР).

Действительна ли геохимия в зоне многолетней мерзлоты? Большая часть районов многолетней мерзлоты Канады в прошлом была покрыта ледниками [12, 21]. Следовательно, проведение геохимических поисков сталкивается здесь с двумя проблемами: 1) поверхностные отложения, связанные с оледенением, часто не

соответствуют подстилающим коренным породам и 2) недостаточно интенсивно выветривание и выщелачивание. Первая проблема имеет значение также и для большей части южной Канады (южнее 60°C), где отрицательное влияние оледенения удалось преодолеть почвенно-геохимическими, гидрогеохимическими и биогеохимическими методами. Представление о том, что многолетняя мерзлота является «мертвой» средой, замедляющей химическое выветривание, устарело. В Антарктике [17] и на Аляске [1] в районах многолетней мерзлоты породы, а следовательно, и минерализованные рудные зоны выветриваются и выщелачиваются; почвы там также выщелачиваются, а образующиеся глины поглощают катионы. Даже в зоне сплошной многолетней мерзлоты, как упоминалось выше, вероятно, существует множество подтаявших участков, которые могут быть соединены с более крупными водными массами. Это может привести к образованию ореолов рассеяния в водах и осадках озер и рек даже в районах сплошной многолетней мерзлоты.

Образование ореолов аномальных концентраций металла поблизости от рудной минерализации происходит при выветривании и выщелачивании. В зоне многолетней мерзлоты ореол образуется при физическом рассеянии частиц благодаря перигляциальным процессам, таким, как криотурбация (вспучивание под воздействием мороза) и солифлюкция (движение почв). Эти перигляциальные процессы выносят материал из глубины на поверхность. В Арктике формации пород, покрытые коллювием, часто определяют путем визуального изучения расстрескавшихся под воздействием мороза обломков породы внутри или на поверхности участков вспучивания пород. Природа криотурбации [26] такова, что она стремится (процессы пока еще не совсем понятны) сделать однородным активный слой, лежащий над постоянно мерзлыми породами и оттаивающий каждое лето. Такая гомогенизация позволяет заменить классическое опробование почв по горизонту В южнее зоны многолетней мерзлоты опробованием участков морозного выпучивания. К тому же в зоне многолетней мерзлоты почвы горизонтов В (арктические коричневые почвы) чрезвычайно редки.

Необходимо оценить еще один малоизвестный фактор, который может значительно влиять на образование геохимических ореолов в замерзших слоях над минерализованными рудными зонами. Речь идет о возможности переноса ионов в замерзших покрывающих пластах, т. е. о процессе, который только начинает исследоваться. Если этот или похожий процесс не

происходит, маловероятно, что рудная минерализация, находящаяся в зоне многолетней мерзлоты и скрытая перекрывающимися отложениями, сможет образовать на поверхности аномальный ореол металла. Месторождения, которые можно выявить с помощью геохимических методов в условиях многолетней мерзлоты, должны быть вскрыты активным (оттаивающим летом) слоем или талыми слоями под реками и озерами либо пересекаться ручьями, озерами и гляциальными эрозионными каналами. Таким образом, при проведении геохимических поисков следует концентрировать внимание на опробовании участков, связанных с зонами таяния многолетней мерзлоты или с элементами рельефа, пересекающими ее до талых горизонтов. Пробы, взятые из-под постоянно замороженных ледниковых отложений, будут полезными в региональной геохимии, если известна ледниковая история. Тем не менее, учитывая количество известных месторождений, установленных поверхностными проявлениями, в северной Канаде должно быть гораздо больше месторождений, скрытых ледниковыми отложениями незначительной мощности. Именно при поисках подобных месторождений в районах развития многолетней мерзлоты могут быть применены поверхностные геохимические методы.

Общее описание ландшафта. Геологию района Коппермайн описали Барагар и Дональдсон [4]. Два основных района исследований расположены в поясе базальтов Коппермайн-Ривер длиной около 200 км, шириной 12—40 км и мощностью порядка 5 км. Верхние 1,5 км этой толщи сложены переслаивающимися вулканическими и осадочными породами, а нижние горизонты — только вулканическими породами. Базальты подстилаются доломитами Хорнби-Бей (фиг. 1) и перекрываются толщей переслаивающихся песчаников, сланцев и доломитов мощностью 5 км. Возраст пород группы Коппермайн-Ривер колеблется от 1200 млн. лет для нижних до 740 млн. лет для верхних формаций [3].

Потоки базальта полого падают в северном направлении под углом до 11° . Западная часть пояса представляет собой пологую антиклиналь северо-западного простирания, центральная и восточная части — пологую синклиналь с осями север-северо-восточного простирания, полого погружающимися на север. Разломы в базальтах имеют направление от северо-восточного до северо-западного и представлены нормальными сбросами или сбросами по простиранию.

В 1967 г. компанией «Коппермайн-Ривер» была открыта зона 47 — рудное тело с запасами 4,1 млн. т руды (среднее содержание меди в

руде 2,96%, во вмещающих породах — 0,6%). Эта зона расположена в нарушении, оперяющем главный сброс Тишерпи, протяженность которого 75 км, простирание СВ 50°, падение вертикальное.

Рудная зона 47 сложена сильно брекчированными, с пятнами малахита базальтами, выходящими на поверхность между двумя базальтовыми гребнями. Она представляет собой пологовпадающую брекчиевую зону, пересекающую базальтовые потоки и расположена в 250—300 м к юго-востоку от сброса Тишерпи. Зона брекчирования вертикального падения, имеет пережимы, раздувы и простирается в длину почти на 500 м. Основными промышленными минералами являются халькозин и борнит с небольшим количеством халькопирита, ковеллина и пирита. Сульфидные минералы образуют относительно крупные вкрапления и массивные прожилки между обломками, а также встречаются в виде мелких включений в базальтовой массе. Средняя ширина минерализованной зоны 20—60 м, кровля горизонтальная, а подошва слабо наклонена на юго-запад.

Рудопроявление 13 расположено в 11 км к западу от озера Хоп (см. фиг. 2) и представлено минерализованной кварцевой жилой мощностью от 0,6 до 1,2 м, длиной более 6 км. Жила состоит из массивных сульфидных, в основном борнитовых руд в кварце. Имеется также небольшое количество халькопирита и пирита, но промышленного значения жила не имеет.

Район Коппермайн является областью интенсивного плейстоценового оледенения с признаками как сильной ледниковой эрозии («бараньи лбы» у рудопроявления 13, ледниковые отложения типа комплексов эскера, около зоны 47). Сейчас это холодная пустыня с перигляциальными признаками (морозные вздутия, угловатые склоны и др.).

Несмотря на сложный характер ледниковых отложений, арктические коричневые почвы покрывают большую часть зоны 47 и развиты как на валунных глинах, так и в участках без валунов. На основе наблюдений по профилям через базальтовый пояс можно сказать, что распространение арктических коричневых почв довольно ограничено и они встречаются только на грубообломочных отложениях, таких, как эскеры или камы. Арктические коричневые почвы в зоне 47, возможно, двухъярусные, так как они состоят из пылеватой глины горизонта В на горизонте С, сложенной валунной и безвалунной глиной, смешанной с грубозернистым песком. Нетрудно себе представить процесс, в результате которого произошло бы такое резкое структурное изменение в пер-

вичном материале. Кроме того, около зоны 47 горизонты С над плитой многолетней мерзлоты представлены известняковыми отложениями в виде крупного галечника, покрытого в нижней части белым осадком CaCO_3 (определено дифрактометрическим методом). Такое своеобразие отложений согласуется с климатом холодной пустыни и связано с вертикальной миграцией воды в почве в сторону поверхности. Это свидетельствует также об активном растворении и выщелачивании почв над многолетней мерзлотой, которая в этой грубозернистой валунной и безвалунной глине обычно начинается на глубине 1—1,2 м. Движение воды над верхней границей мерзлоты и сквозь активный слой происходит быстро, но сложным путем. В течение 24 ч небольшие котловины в зоне 47 быстро заполняются водой, а затем происходит их разгрузка.

В общем для района Коппермайн более характерен илистый коллювий с множеством морозных вздутий, как, например, на рудопроявлении 13. Это рудопроявление расположено на пологом склоне холма с активным илистым поверхностным слоем обычно толщиной 60—90 см, залегающим непосредственно на коренных породах. На рудопроявлении арктических коричневых почв не обнаружено.

Количество морозных вздутий, очевидно, определяется структурой активного слоя, формами рельефа и шириной местности. В районе озера Хоп морозные вздутия развиты очень широко, особенно на плоских участках с тонкозернистой структурой активного слоя. В отложениях, развитых севернее базальтов озера Хоп, часто встречаются только морозные вздутия, пересекающие границы растительного покрова.

МЕТОДЫ

Методы полевого опробования. В зоне 47 пробы почв брались по сетке 2200 на 2400 футов, из горизонта О/А — по сетке 200 на 200 футов, из горизонта В — по сетке 200 на 100 футов, а из морозных вздутий — через каждые 100 футов на протяжении 1000 футов. В расположении точек опробования были некоторые отклонения из-за наличия каменных потоков, плотных каменных полей, солифлюкционных впадин и современных водотоков. Сетка опробования на рудопроявлении 13 неравномерна; она контролировалась структурой потоков рассеяния и выходами пород. Опробование производилось по линиям, перпендикулярным простиранию жилы через каждые 90 м на расстоянии 630 м по простиранию.

Длина наиболее протяженного профиля составляет 480 м. Все пробы брались с глубины в несколько дюймов илистого материала морозных вздутий, опробованных по профилю через возрастающие интервалы от жилы. По одному из профилей пробы были взяты как с поверхности морозных вздутий, так и непосредственно над коренной породой. Здесь многолетняя мерзлота начинается обычно ниже поверхности коренной породы. Фоновые пробы горизонтов О/А и В взяты в районе зоны 47 и озера Хоп. Фоновые пробы морозных вздутий собраны с большей площади.

Опробование горизонтов О/А оказалось трудоемким, так как трудно соблюдать однородность проб. Прерывистость поверхностного органического горизонта арктических коричневых почв, а также очень небольшая его мощность и каменистость не позволяют рекомендовать его для геохимического опробования. Даже на благоприятных участках потребуется охватить большие площади, чтобы получить пробы достаточного для анализа веса. Опробование горизонтов В оказалось гораздо проще, чем горизонтов О/А, хотя эти горизонты тоже прерывисты и местами необходим пробоотбор со значительной площади. Горизонты С в арктических коричневых почвах характеризуются очень грубой структурой, что также затрудняет опробование. Лучшей геохимической средой для опробования в арктических коричневых почвах считают горизонты В. Однако, как уже упоминалось выше, эти почвы в зоне 47 распространены весьма ограниченно, но даже там, где преобладают арктические коричневые почвы, трудно найти для целей опробования достаточное количество илистых морозных вздутий. Механизм регенерации вздутий приводит минеральные почвенные горизонты над мерзлыми породами к гомогенизации, что позволяет брать поверхностные пробы, отражающие состав отложений на глубине. Морозные вздутия служат также аккумуляторами мелких частиц в своей обнаженной центральной части, где камни отодвинуты в сторону, и находятся под растительным покровом на краях кратера морозного вздутия. Благодаря этому небольшая проба, взятая из центральной части, обеспечивает достаточное для анализов количество материала крупностью — 80 меш. Кроме того, согласно последним советским исследованиям [20], содержание рассеянных элементов (Cu, Zn, Pb, Nb, Y) в морозных вздутиях выше, чем в почвах того же района и очень близко к содержанию их в подстилающей многолетней мерзлоте. Поэтому илистый материал морозных вздутий наиболее пригоден для геохимических ис-

следований в районе Коппермайн и авторы рекомендуют его для опробования.

Для получения хороших проб из илистого материала донных осадков, таких, какие были собраны около зоны 47, необходимо копать вручную в ложе ручья. В этом районе сплошной многолетней мерзлоты температура воды около 1°C и брать пробы донных осадков довольно неприятно. Для опробования рекомендуется использовать специальные приспособления, но, конечно, с обычными мерами предосторожности во избежание загрязнения проб. В связи с отмеченными выше резкими колебаниями уровней воды в ручьях и мелких котловинных озерах не рекомендуется брать из них пробы воды.

Пробы воды были взяты из более крупных озер (длина по диагонали 300 м), сравнительно меньше подвергающихся резким колебаниям уровней под влиянием дождей, подземных вод и движения активного слоя. Образцы озерной воды брались дважды с интервалом около двух недель. Постоянство концентраций меди подтверждает предположение о том, что более крупные озера не столь подвержены влиянию осадков и резким колебаниям уровня воды, как маленькие ручьи и котловинные озера. Пробы озерной воды брались в двух экземплярах в полиэтиленовые бутылки, предварительно трижды промытые озерной водой.

Биогеохимическое опробование обычно не вызывает трудностей, но при ограниченном растительном покрове и карликовой растительности отбор пробы, достаточной для анализа, требует определенного времени. Лишайники трудно разделить на отдельные виды перед сжиганием, в результате чего они практически непригодны для опробования.

В районах многолетней мерзлоты земля обычно заморожена с поверхности большую часть года (8—9 месяцев), но летом поверхностный (активный) слой оттаивает. В районе Коппермайн грубозернистый грунт оттаивает на 1—1,2 м. Однако, как и повсюду в зоне многолетней мерзлоты, колебания глубины таяния определяются географической широтой, высотой над уровнем моря, температурой воздуха, структурой почв, растительным покровом, уровнем грунтовых вод, характером гидросети и снежным покровом [12]. Почвы с многолетней мерзлотой разделяют на два вида: одни замерзают как с поверхности, так и на глубину, а оттаивают с поверхности; другие всегда замерзают и оттаивают с поверхности. Ввиду того что многолетняя мерзлота играет роль непроницаемого барьера для движения воды, почвы обычно отличаются влажностью и мало просыхают за лето. В обстановке ледниковой

многолетней мерзлоты рассеяние катионов из руд может происходить тремя основными путями: 1) гляциальный перенос частиц руды, 2) перигляциальный перенос частиц руды, 3) химический перенос катионов.

Гляциальные и перигляциальные черты, определяющие ландшафт района Коппермайн, указывают на преимущественное распространение первых двух способов. Величина концентрации меди в водах озер свидетельствует, однако, о том, что существует и химический перенос.

Методы лабораторных анализов. Фракции -10 меш и $+80$ меш горизонта O/A и пробы из морозных вздутий, а также пробы донных осадков были подвергнуты химическому анализу следующим образом: 3 мл 4 н. HNO_3 смешивали с пробой весом 200 мг в трубке, которую затем помещали на 1 ч в ванну с водой, перемешивали и разбавляли до 10 мл водой без примесей металла, снова перемешивали, центрифугировали и анализировали методом атомной абсорбционной спектроскопии. Используемый метод анализа дает общее представление о содержании металла в пробах. Методы полного разделения меди в форме сульфидов и поглощенной свободными гидроокисями железа пока недоступны. Зола растений также анализировалась вышеприведенным способом. Пробы донных осадков анализировались методом холодной экстракции HCl по способу Уарда и др. [25]. Медь определялась колориметрически. При этом способе извлекается, видимо, только медь, перемещенная химическим путем и последовательно поглощенная и осажденная, в то время как медь, содержащаяся в частицах сульфидов, не переходит в раствор. Пробы озерной воды анализировались методом атомной абсорбционной спектроскопии после предварительного концентрирования для некоторых катионов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Изображение результатов. Концентрации металла в почвах, источниках, донных осадках и золе растений выражены в миллионных долях. Концентрации в озерной воде приводятся в миллиардных долях. Результаты анализов озерной воды представлены на карте озер, где черным цветом выделены уровни аномальных концентраций. Результаты анализов проб донных осадков показаны на плане гидросети, причем толщина линий соответствует концентрациям меди. Карты аномалий меди составлены на ЭВМ по результатам анализов арктических коричневых почв зоны 47 и морозных вздутий рудопроявления 13.

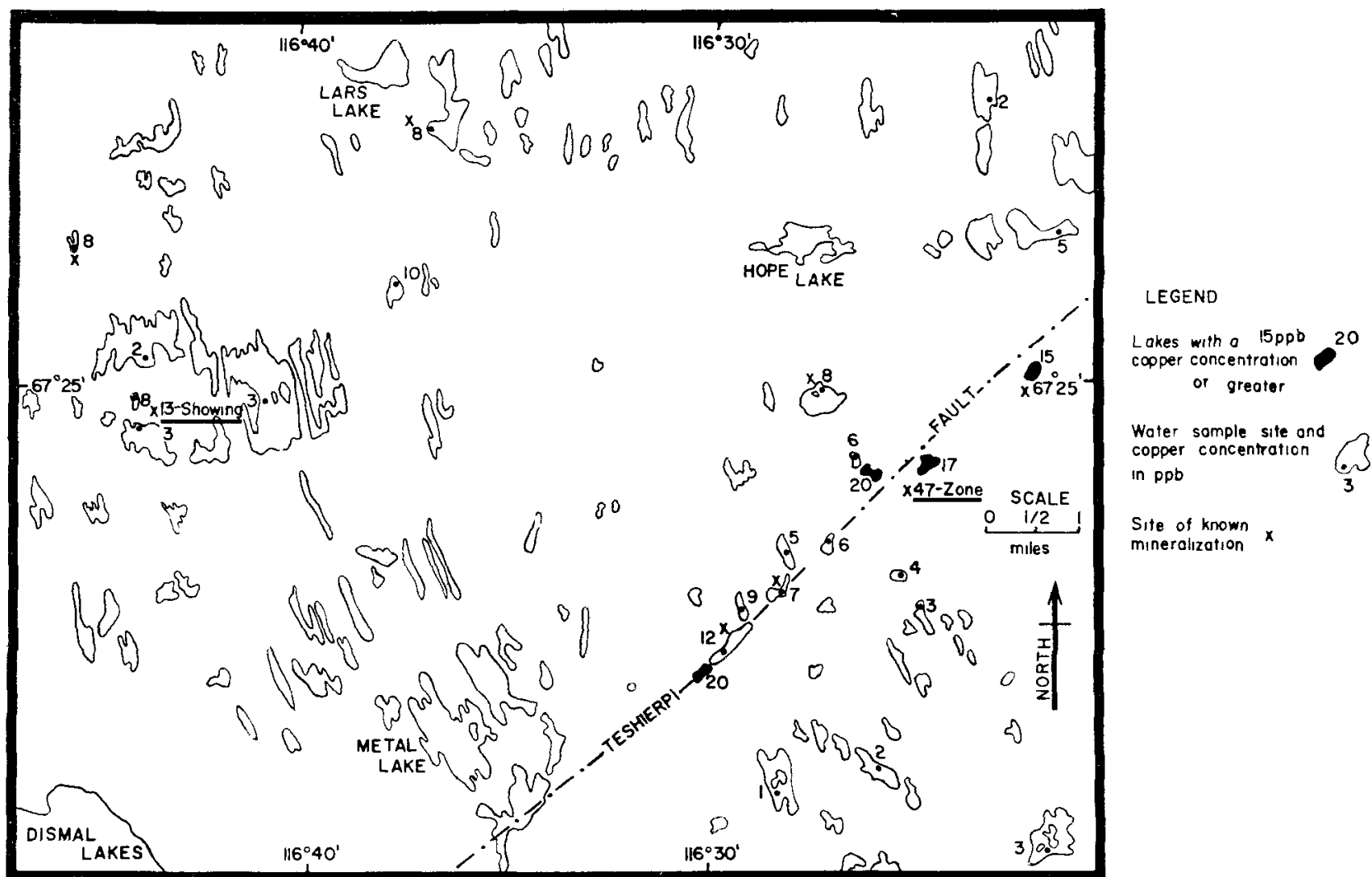
Сеть опробования, контуры рудного тела и положение кварцевой жилы показаны на картах аномалий. Профили опробования морозных вздутий на медь составлены также для зоны 47 и рудопроявления 13.

В зоне 47 профили опробования проводились через 200 футов; пробы брались через каждые 100 футов из горизонта В и через 200 футов из горизонта O/A. На рудопроявлении 13 линии профилей опробования проходили через 300 футов, расстояние между пробами прогрессивно сокращалось по направлению к базисной линии с 200 футов до менее 10 футов.

Схематические карты основывались на данных, подсчитанных по правильной 10-футовой сетке для зоны 47 и по 20-футовой сетке для рудопроявления 13. Каждая цифра на сетке объединяет в среднем 9 соседних точек в пределах площади эллипса с главной осью, перпендикулярной линии профиля опробования.

Результаты исследования озерных вод. Исследования концентраций меди в озерных водах (фиг. 2) показали, что фоновые концентрации меди равны 2 млрд⁻¹, пороговые концентрации 8 млрд⁻¹ и аномальные 15 млрд⁻¹. Фоновые концентрации в основном наблюдаются в озерах, вблизи которых не обнаружено рудных проявлений. Пороговые концентрации связаны с озерами, сообщаемыми со слабо минерализованными участками. Из 25 исследованных озер в четырех обнаружены аномальные концентрации, причем все четыре озера расположены в долине, приуроченной к разлому Тишерпи. В двух озерах, расположенных ниже в непосредственной близости от зоны 47, содержание меди достигало 15 млрд⁻¹ и 20 млрд⁻¹. В третьем озере северо-восточнее зоны 47 и на разломе Тишерпи содержание меди составляло 15 млрд⁻¹, что может быть связано с медной минерализацией в кварц-карбонатных отложениях на выходе, расположенном приблизительно в 1950 м к северо-востоку от зоны 47. Четвертое озеро юго-западнее зоны 47 в долине, приуроченной к разлому Тишерпи, находится в конце цепи озер и содержит 20 млрд⁻¹ Cu ; такое содержание меди в четвертом озере может объясняться тем, что оно замыкает дренажную систему. Содержания меди в озерах базальтового пояса Коппермайн-Ривер относительно низкие по сравнению с озерами в СССР (от 3 млрд⁻¹ до 31 млрд⁻¹ [19]). Однако ни одно из озер, исследованных А. И. Перельманом и Е. Н. Борисенко, не расположено в районах многолетней мерзлоты.

Наличие в водах озер меди в измеримых содержаниях, которые могут быть связаны с оруденением, говорит о химической миграции



ФИГ. 2. Расположение озер, воды которых опробовались на медь, базальтовый пояс Коппермайн-Ривер, Северо-Западные территории.

меди в растворе, однако активное рассеяние меди из минерализованных зон, возможно, происходит в какой-то иной форме. Другие катионы, определенные в озерных водах, не показали связи с известной рудной минерализацией. Концентрации таких катионов, как Zn, Pb, Ni, Co и Mn, в большинстве случаев оказались ниже порога чувствительности применяемого метода анализа. На основе результатов анализов по 25 озерам методом донных осадков были в дальнейшем исследованы окрестности только двух озер: озеро южнее зоны 47 и озеро, расположенное в 1950 м к северо-востоку от зоны 47.

Результаты исследования донных осадков по зоне 47. Многолетняя мерзлота при движении воды вниз в поверхностных отложениях играет роль непроницаемого барьера. Поскольку в районах многолетней мерзлоты дренаж затруднен, предпочтительнее опробовать осадки вод, вытекающих из озер с аномальными концентрациями меди, чем впадающих в эти озера. В результате такого подхода в донных осадках

четырёх ручьев в зоне 47 обнаружены концентрации меди.

1. *Медь, извлекаемая горячим раствором HNO_3 .* Аномальные концентрации меди были обнаружены лишь в двух ручьях, пересекающих зону минерализации (фиг. 3а). Для этих аномалий содержание меди вверх по ручью от зоны минерализации составляло от 800 млн⁻¹ до 1000 млн⁻¹. После пересечения рудного тела в 450 м вниз по ручью были обнаружены содержания около 3000 млн⁻¹ Cu. Эти аномальные концентрации следовало бы проследить и дальше, но ручьи сливаются и впадают в небольшое озеро. В двух других ручьях, по обе стороны зоны 47, концентрации меди не превышают 2000 млн⁻¹ (в основном 1500 млн⁻¹ Cu, фиг. 3а). На третьем ручье рядом с точкой концентрации меди, равной 1287 млн⁻¹, обнаружена минерализованная брекчия (фиг. 3а). Это может быть причиной несколько более высоких ниже по ручью концентраций (до 1995 млн⁻¹ Cu).

2. *Медь, извлекаемая холодным раствором*

НСI. С помощью этого метода было замечено подобное распределение концентраций меди (фиг. 3b) и в донных осадках. Из каждой отдельной пробы извлекалось значительно меньше меди (обычно около трети), чем при горячей экстракции, но соотношения концентраций свидетельствовали о наличии минерализованной зоны, так же как и при методе горячей экстракции. Кроме того, метод холодной экстракции НСI очень удобен для полевых условий.

На основании вышеприведенных результатов можно сказать, что опробование донных осадков с интервалами 300 м или менее при любом описанном методе анализа проб позволяет установить наличие месторождения, размеры которого соответствуют размерам зоны 47.

Сравнение результатов опробования морозных вздутий по зоне 47. Сравнение горизонтов О/А и В. При последующей детализации было установлено, что анализ проб горизонта О/А по зоне 47 дал более размытую и менее эффективную карту аномалии (фиг. 4), чем «общие» и «истинные» пробы горизонта В (фиг. 5 и 6). Отчасти это можно объяснить тем, что на горизонтах О/А опробование производилось с интервалами 60 м, а на горизонтах

В — с интервалами 30 м. Однако на полурегиональном уровне пробы с поверхности горизонта О/А могут конкурировать с пробами донных осадков. Горизонты О/А не пытались разделить на «общий» и «истинный», как это было сделано для горизонтов В. В районах развития арктических коричневых почв предполагается проводить опробование по горизонту В, а не по горизонтам О/А, так как, во-первых, распределение меди в этом горизонте наиболее эффективно установило минерализацию зоны 47, а, во-вторых, опробовать горизонт В удобнее и проще.

«Общие» и «истинные» пробы горизонтов В. Пробы по горизонтам В брались в каждой точке сети, но, поскольку вблизи зоны 47 не удавалось взять пробу почв, в некоторых случаях брались пробы донных осадков, солифлюкционных впадин или рудной брекчии. По результатам проб на всех точках сети составлена «общая» карта аномалий горизонта В (фиг. 5). В других случаях (фиг. 6) геохимическая аномальная карта создавалась лишь по «истинным», т. е. действительным, пробам горизонта В арктических коричневых почв.

Цель этой операции была двойкой. На фиг. 5

Таблица I

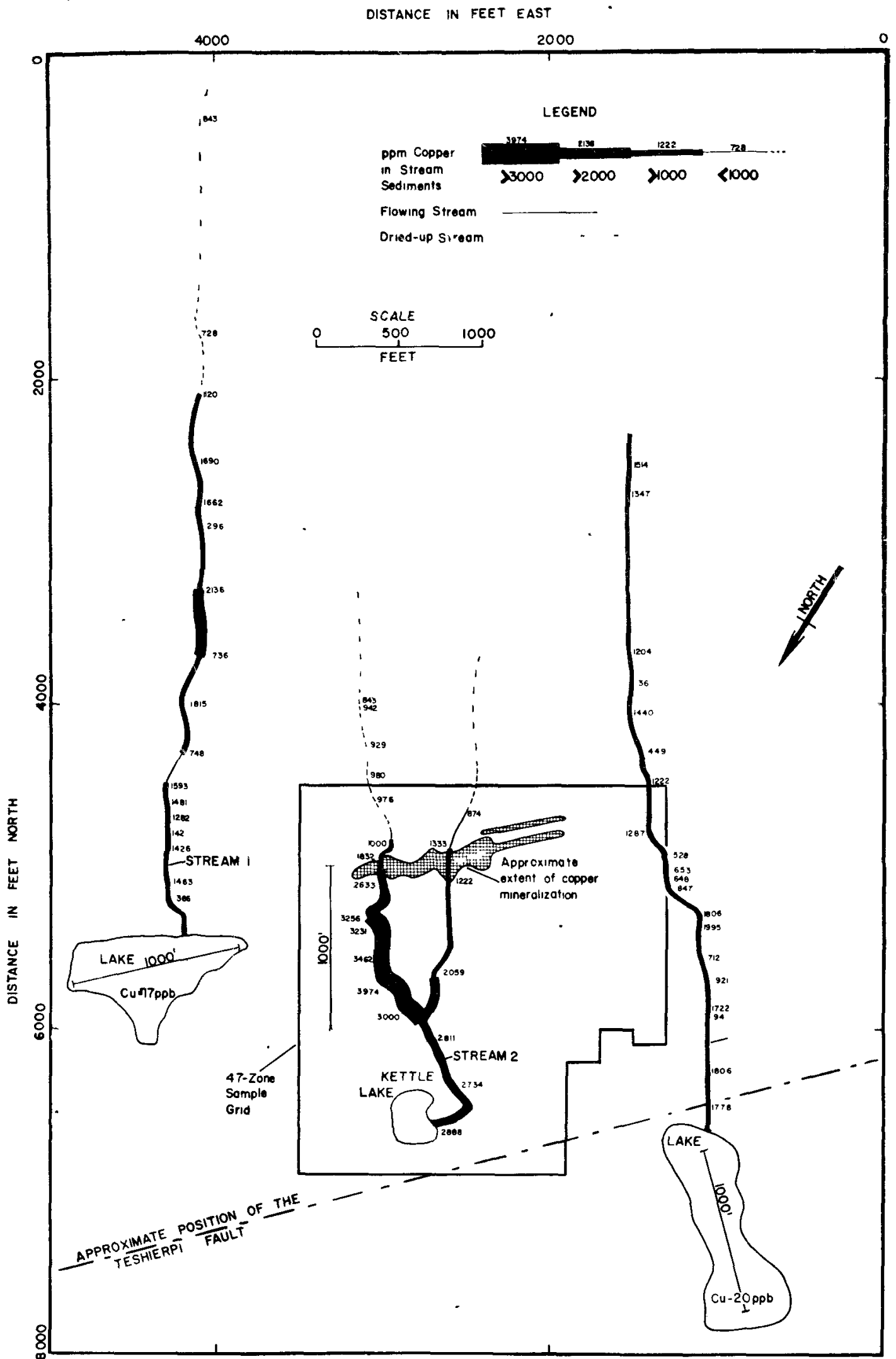
Содержания металлов (млн⁻¹) на горизонтах трех арктических коричневых почв зоны 47

Подстилающие ледниковые отложения	Горизонты	Глубина, см	Медь ¹	Цинк	Марганец	Серебро
Тилль	О/А	0—5	85	65	1042	0,5
	В	5—25	54	38	453	н. о. ²
	В/С1	25—45	146	57	860	н. о.
	С1	45—90	153	63	922	н. о.
	Многолетняя мерзлота	90+	н. п. ³	н. п.	н. п.	н. п.
Наносы (терраса или конус выноса)	О/А	0—4	115	51	953	н.о.
	В	4—25	169	32	464	0,5
	С1	25—90	2935	51	1995	н.о.
	Многолетняя мерзлота	90+	н. п.	н. п.	н. п.	н. п.
Наносы (неподвижный ледник)	О/А	0—2	132	44	736	н. о.
	В	2—30	149	32	420	н. о.
	С1	30—25	286	40	876	н. о.
	С2	35—90	415	57	1096	0,5
	Многолетняя мерзлота	90+	н. п.	н. п.	н. п.	н. п.

¹ Горизонты В всех трех почв не содержат аномальных содержаний меди.

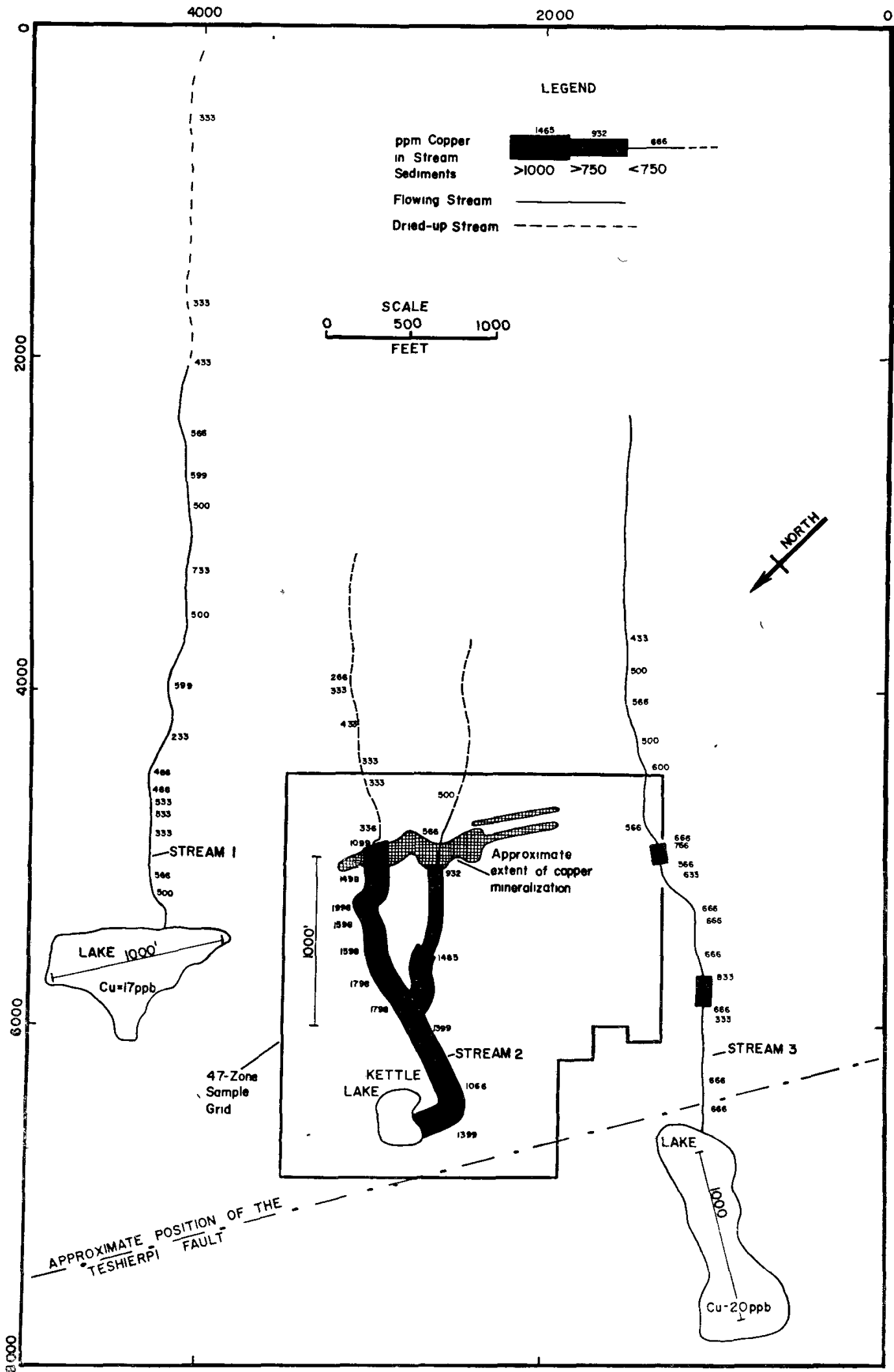
² н. о. — не обнаружено.

³ н. п. — нет проб.



(a)
Hot HNO₃

ФИГ. За. Содержание меди, извлекаемой горячей экстракцией из донных осадков района зоны 47, базальтовый пояс Копермайн-Ривер, Северо-Западные территории.

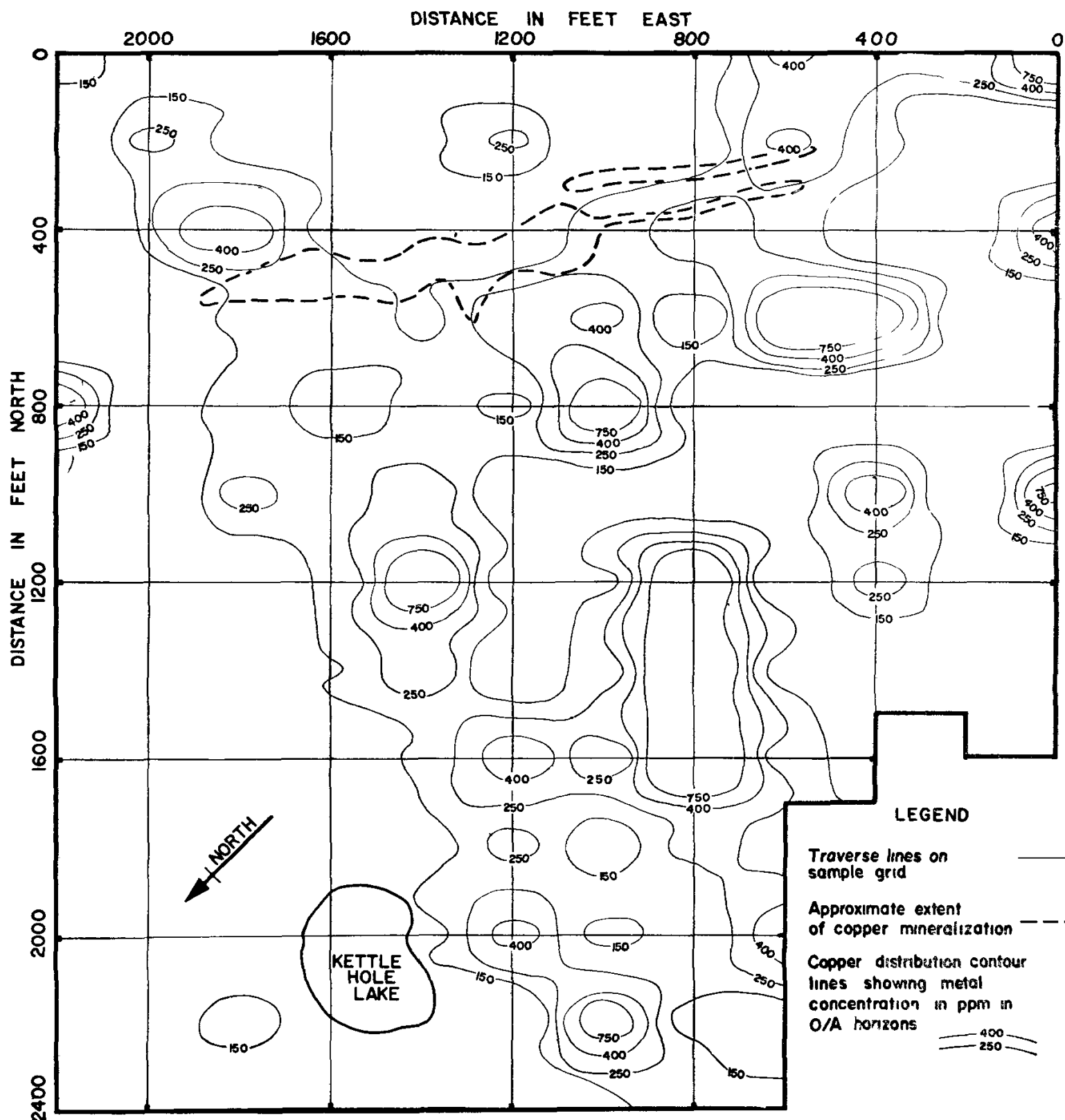


(b)
Cold HCl

ФИГ. 3в. Содержание меди, извлекаемой холодной экстракцией из донных осадков района зоны 47, базальтовый пояс Коппермайн-Ривер, Северо-Западные территории.

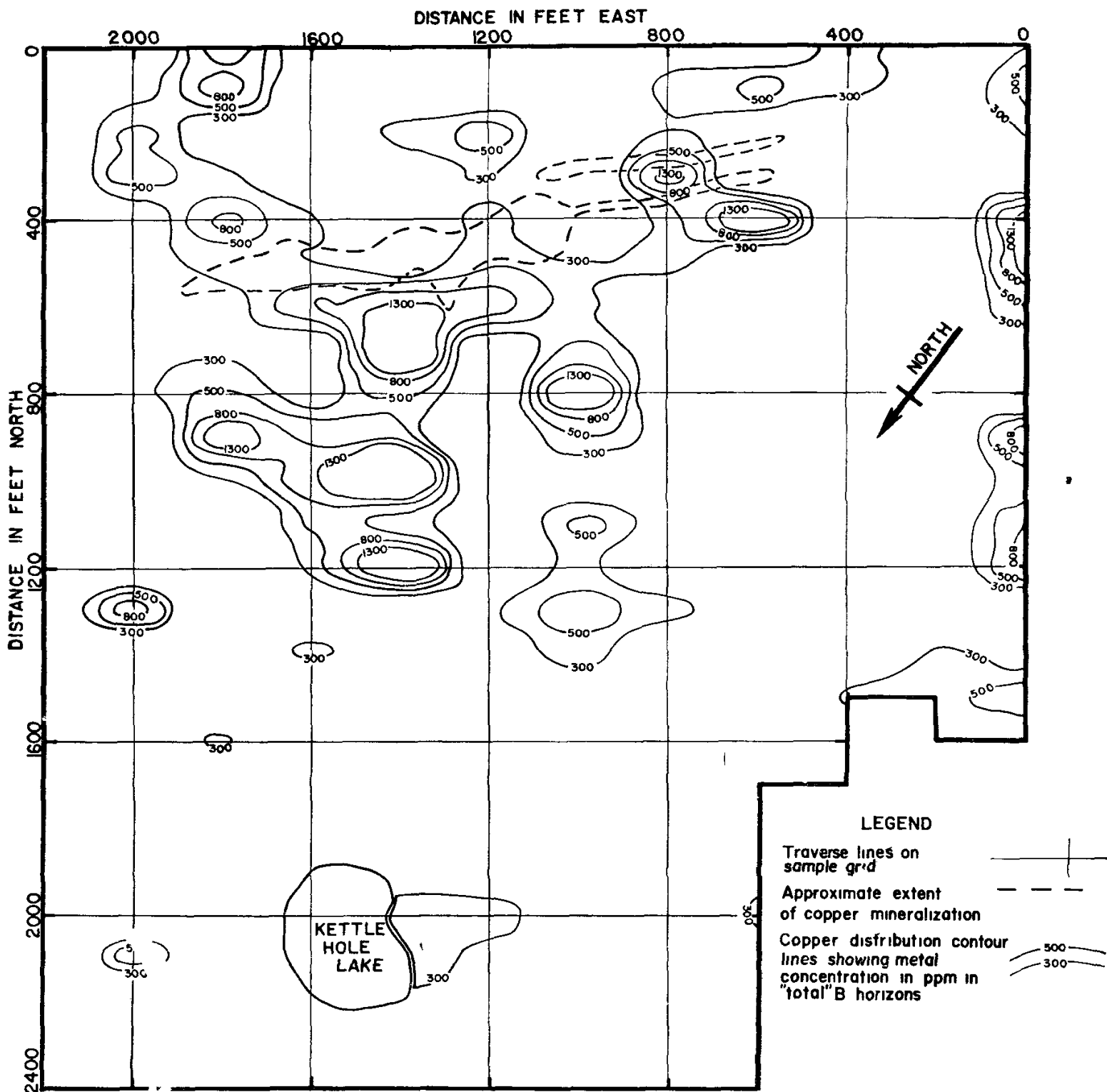
показан тип карты, составленной по результатам анализа проб, отобранных вблизи зоны 47 людьми, не знакомыми с особенностями почв и ледниковой геологии, которые просто брали пробы почв из-под перегноя на каждой точке сетки. Составленная карта аномалий наряду с данными донных осадков определяет зону рудной минерализации и показывает, что по крайней мере для зоны 47 этот метод опробования

оказался эффективным. Анализ карты, приведенной на фиг. 6, показывает, что, если бы зона 47 была полностью покрыта арктическими коричневыми почвами и руда не имела бы выхода на поверхность, опробование «истинных» горизонтов В выявило бы оруденение зоны 47. Таким образом, карта, приведенная на фиг. 6, имеет более важное значение, поскольку она помогает успешно предсказать наличие оруде-



ФИГ. 4. Геохимическая карта распределения меди в горизонте O/A в районе зоны 47, базальтовый пояс Коппермайн-Ривер, Северо-Западные территории.

Сетка карты — линии профилей по сетке опробования, пунктиром показано приблизительное распространение медной минерализации, сплошными линиями показаны контуры распределения меди, соответствующие содержаниям металла в миллионных долях в горизонте O/A



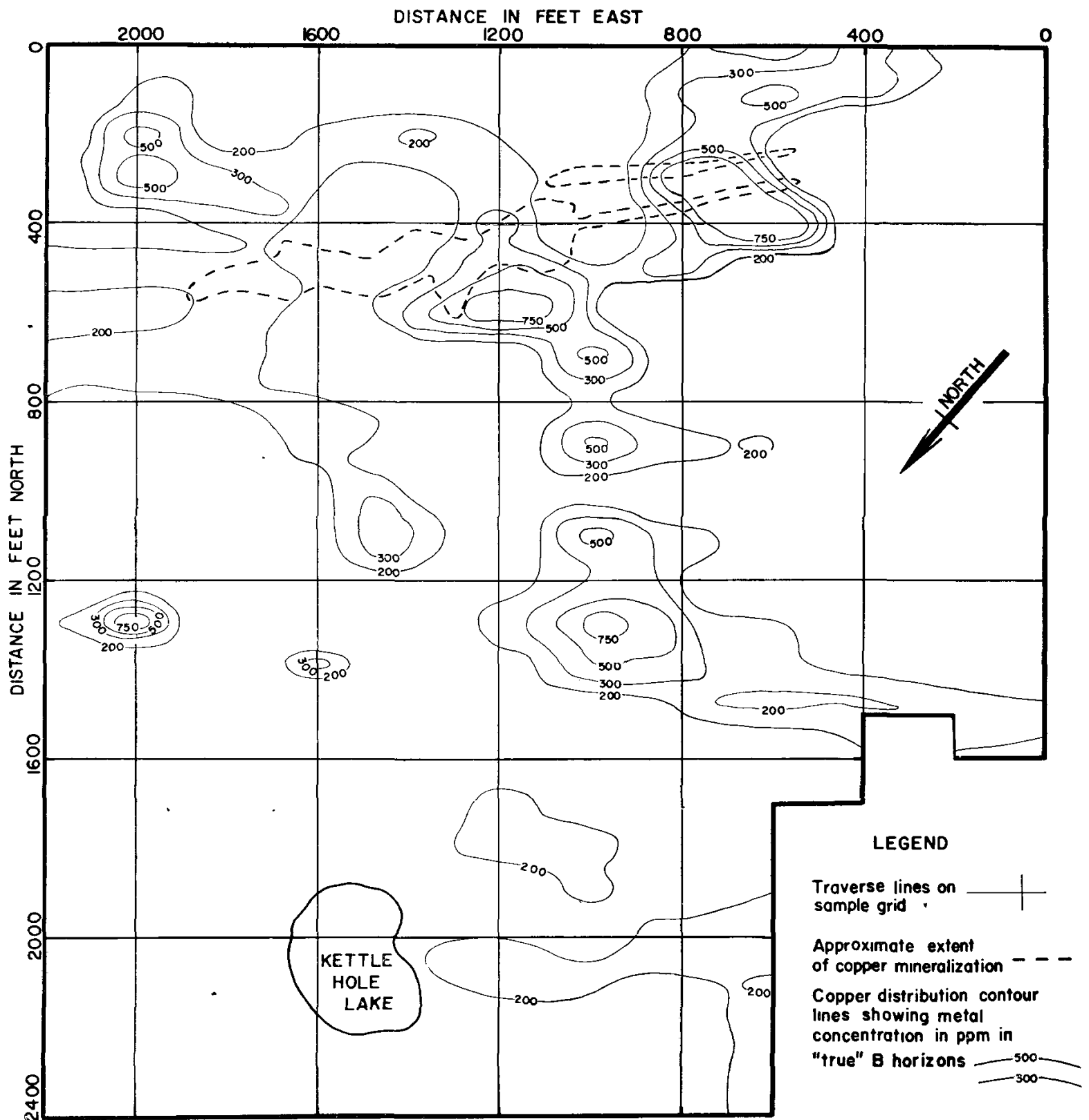
ФИГ. 5. Геохимическая карта распределения меди в горизонте В (по «общим» пробам) в районе зоны 47, базальтовый пояс Коппермайн-Ривер, Северо-Западные территории.

нения в зоне многолетней мерзлоты даже в тех случаях, когда оно не выходит на поверхность.

Сравнение горизонтов С и В. В табл. I приводятся результаты анализов арктических коричневых почв по горизонтам О/А, В и С, опробованным на трех участках развития представительных для зоны 47 ледниковых отложений. Как видно, содержание меди в горизонте С постоянно самое высокое. Поскольку горизонт С залегает непосредственно на многолетней мерзлоте, полученные результаты могут означать (не окончательно, так как были исследованы только три участка), что опробование арктиче-

ских коричневых почв лучше производить как можно ближе к многолетней мерзлоте. Однако в районах многолетней мерзлоты арктические коричневые почвы встречаются только на очень грубозернистых валунных отложениях, поэтому опробование горизонтов С очень затруднено и может быть оправдано только на заключительной стадии геохимических поисков.

В зоне 47 аномальные по сравнению с фоновыми концентрации меди в илистом материале морозных вздутий были шестидесятикратными по сравнению с двадцатипятикратными в почвах горизонтов В на одних и тех же профилях



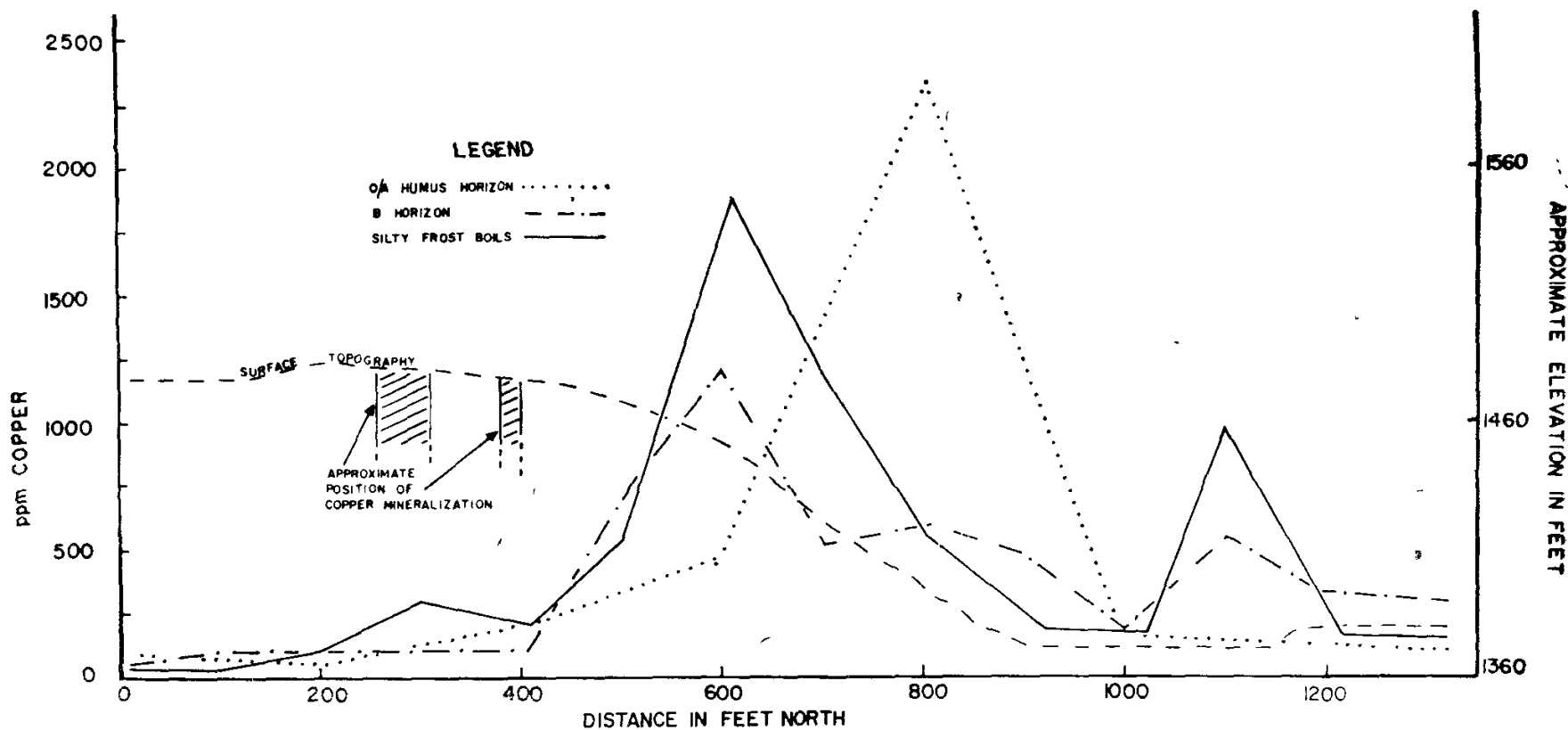
ФИГ. 6. Геохимическая карта распределения меди в горизонте В по «истинным» пробам в районе зоны 47, базальтовый пояс Коппермайн-Ривер, Северо-Западные территории.

(фиг. 7). Следовательно, даже в зоне 47, где морозных вздутий сравнительно мало, они все-таки наиболее благоприятны для опробования, чем почвенные горизонты.

Результаты исследования растительности в зоне 47. В табл. II приводятся результаты анализов на медь карликового лупина, вереска и трех видов лишайников. Величины концентрации меди в пробах растений и почв выявляют некоторую корреляцию, но для выясне-

ния их соотношений необходимы дальнейшие исследования. Сейчас такое исследование неоправданно, поскольку для определения распределения меди в районе развития базальтов Коппермайн-Ривер эффективнее опробовать другие образования.

Ветки и листья *potentilla*, собранные у ручьев 1 и 3 (фиг. 3) в зоне 47 были проанализированы на Cu, Zn, Ag и Mn. Установлено, что медь концентрируется в основном в ветках.



ФИГ. 7. Аномалии по почвам и морозным вздутиям (сравнение по линии профиля через зону 47).

Таблица II

Биогеохимические результаты анализов золы растений (млн⁻¹) из зоны 47

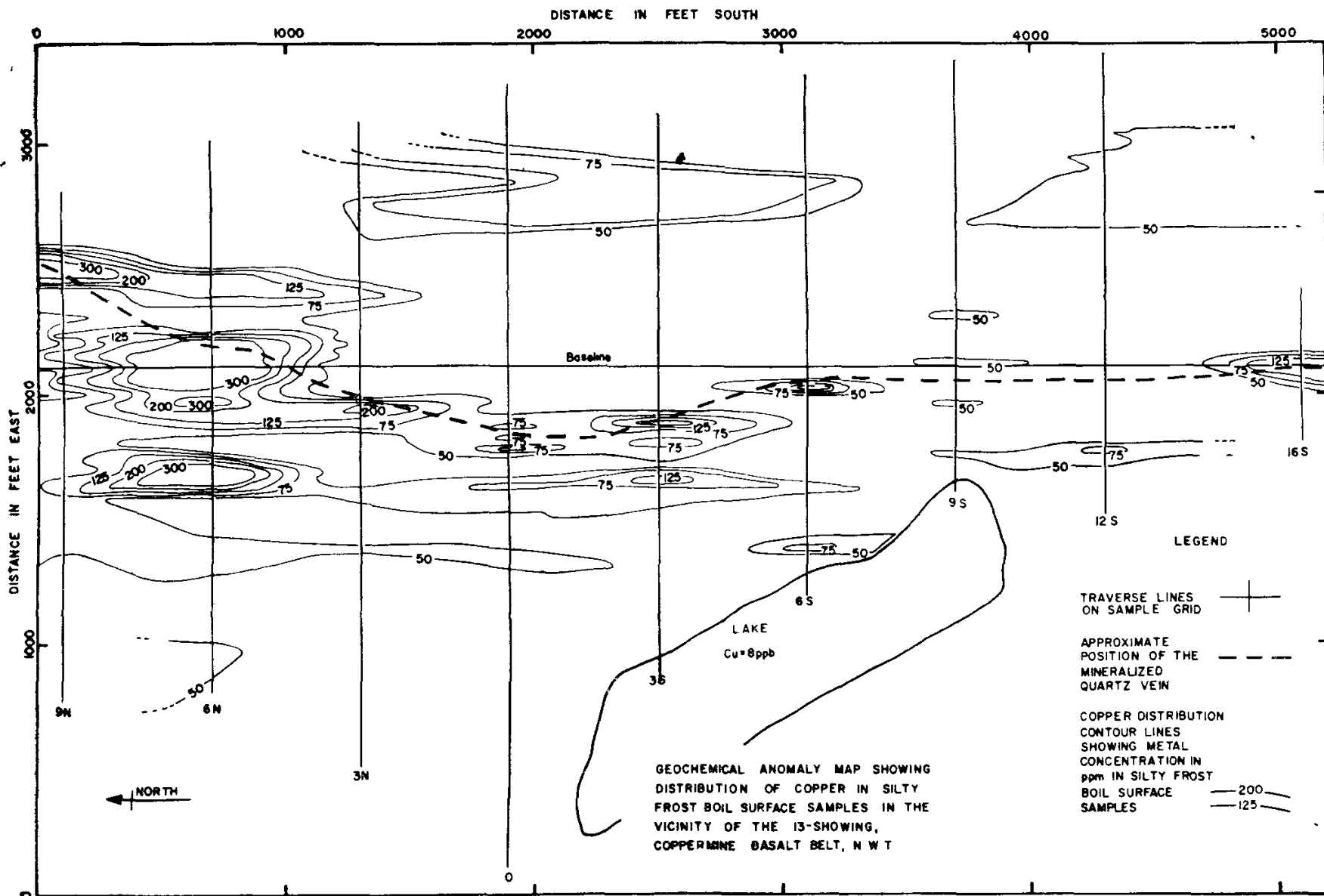
Расстояние (футы) на восток и север по сетке опробования зоны 47	Ожидаемое значение в зависимости от точки опробования	Тип растений				
		карликовый люпин 1	вереск 2	лишайник 1	лишайник 2	лишайник 2
1600 В; 300 С (47 зона)	Фон	50	217	174	217	117
1500 В; 500 С (47 зона)	Аномалия	100	250	443	242	583
975 В; 1500 С (47 зона)	Порог	58	308	н. п. ³	367	133
1700 В; 2430 С (47 зона)	Фон	50	233	125	174	83
На берегу озера Хоп	Фон	58	158	108	108	125

1 Только листья.
2 Все растение.
3 н. п. — нет проб.

Однако *potentilla* растет только около ручьев и по берегам озер, эффективна она как объект опробования при геохимических поисках только при опробовании донных осадков в озерах и ручьях. Однако результаты исследования *potentilla* на медь более неустойчивы и поэтому имеют меньшее значение, чем результаты исследования донных осадков на этих же участках.

Результаты исследования морозных вздутий на рудопроявлении 13. Карта медных аномалий по морозным вздутиям (фиг. 8) указывает на то, что медь рассеяна, возможно, в значительной степени путем солифлюкции не более чем на 60 м ниже минерализованной кварцевой жилы. Концентрация меди здесь

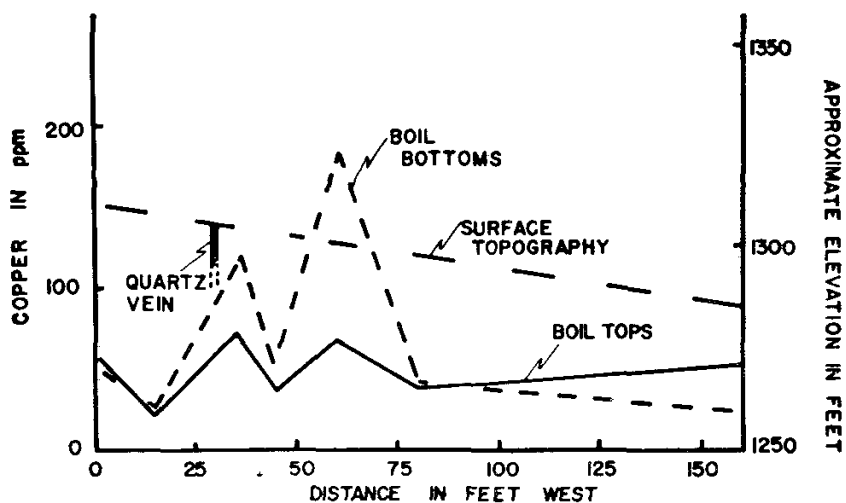
ниже, чем в зоне 47. Всего в нескольких пробах содержание меди превышало 1000 млн⁻¹. Карта аномалии (фиг. 8) определяет положение жилы даже на участке 6N — 3S, который закрыт с поверхности илистым коллювием мощностью 0,6—0,9 м. Самые низкие концентрации меди были установлены между линиями 6S и 12S, где жила выходит на поверхность. Обычно менее чем в 6 м вверх от жилы наблюдается резкое понижение концентрации меди в морозных вздутиях. Значительная аномалия близ линии 6S может быть следствием поверхностного бурения и взрывных работ. Такие же исследования не обнаружили аномально высоких содержаний меди в поверхностных пробах из морозных вздутий, взятых вблизи жилы



ФИГ. 8. Геохимическая карта распределения меди по пробам из илистых морозных вздутий на участке рудопроявления 13, базальтовый пояс Кошпермайн-Ривер, Северо-Западные территории.

между линиями 6S и 12S. Содержание меди, равное 8 млрд⁻¹, в озере у подножия склона

(фиг. 8 и 2) может быть связано с непромышленным медным оруденением.



ФИГ. 9. Профили аномалий по морозным вздутиям (сравнение концентраций меди на рудопроявлении 13, базальтовый пояс Кошпермайн-Ривер, Северо-Западные территории).

Анализы на медь илистой почвы с верхнего и нижнего горизонтов морозных вздутий на линии 1S рудопроявления 13 обнаружили некоторые колебания концентрации. Эти колебания, не превышающие двухкратных (фиг. 9), были значительны только вблизи минерализованной жилы. Дальше от жилы пробы с верхнего и нижнего горизонтов имели одинаковое содержание меди. Таким образом, хотя пробы с поверхности морозных вздутий дают четкое представление о концентрации меди в подтаявшем активном слое (фиг. 7 и 8), вероятно лучше, когда подпочвенный слой маломощный и морозные вздутия удастся опробовать как можно ближе к слоям многолетней мерзлоты. На илистых морозных вздутиях этого можно достигнуть бурением ложечными сверлами.

Результаты регионального исследования фоновых содержаний меди в морозных взду-

Таблица III

Средние и стандартные отклонения для Cu, Ni и Ag (млн⁻¹) в различных материалах, опробованных в районе озера Хоп

Тип опробованного материала	Количество проб	Медь		Никель		Серебро	
		среднее	стандартное отклонение	среднее	стандартное отклонение	среднее	стандартное отклонение
Горизонт О/А	132	337	725	64	21	0,52	0,17
Общий горизонт В	275	346	704	43	16	0,39	0,15
Истинный горизонт В	202	206	290	38	11	0,36	0,09
Морозные вздутия рудопроявления 13	211	93	196	39	12	0,37	0,09
Фон морозных вздутий	9	44	16	47	11	0,75	0,37
Донные осадки	65	1661	693	110	22	1,02	0,21

тиях. Девять проб с поверхности морозных вздутий, взятые по профилю, пересекающему доломиты, базальты и осадочные породы в районе Коппермайн-Ривер (фиг. 1) характеризуются весьма близкими валовыми содержаниями меди. Среднее содержание меди составляет 45 млн⁻¹ при колебании от 20 млн⁻¹ до 71 млн⁻¹ и при стандартном отклонении 16 млн⁻¹. Величина содержания меди в морозных вздутиях регионального профиля позволяет предполагать, что содержания выше 100 млн⁻¹ при горячей экстракции меди HNO₃ или выше 50 млн⁻¹ при холодной экстракции HCl в морозных вздутиях связаны с проявлением минерализации или гидрогеохимической аномалией.

Минеральный состав мелкозернистой фракции отложений (<5 мкм) довольно однороден. Рентгенографическое исследование этой фракции из девяти морозных вздутий показало, что они состоят в основном из слюды и каолинита с небольшим количеством хлорита и вермикулита. Такой же минеральный состав установлен в илистых морозных вздутиях Аляски [1], лежащих на многолетней мерзлоте. По этим данным можно утверждать, что широко распространенные илистые морозные вздутия имеют необычно однородный минеральный состав мелкозернистых фракций и по крайней мере в районе развития базальтов Коппермайн-Ривер также близкие содержания микроэлементов. Эти два обстоятельства характеризуют морозные вздутия как отличную среду опробования для региональных геохимических поисков.

Сравнение аналитических данных. Поскольку работы носили опытный характер, значительное внимание было уделено изучению объектов опробования, оказавшихся в последующем малоэффективными. Пределы содержаний меди в различных опробованных средах следующие: донные осадки — до 4000 млн⁻¹; почвенные горизонты или илистые морозные вздутия — до 1000 млн⁻¹; озерные воды — до

20 млрд⁻¹. Эти исследования показывают, что медь является наиболее эффективным элементом для использования ее при геохимических поисках в районе базальтового пояса Коппермайн-Ривер. Это не удивительно, ибо медь — преобладающий элемент в рудах исследуемого района. Присутствующие в озерной воде остальные элементы (Zn, Pb, Ni, Co и Mn) могут служить индикатором оруденения. То же самое можно утверждать и в отношении всех проб почвы и донных осадков, которые анализировались на медь, серебро, никель и марганец. Содержание никеля как в зоне 47, так и на рудопроявлении 13 статистически одинаково. Среднее содержание никеля в зоне 47 составляло 40 млн⁻¹ при стандарте 11 млн⁻¹ (для сравнения 39 млн⁻¹ и 12 млн⁻¹ соответственно на рудопроявлении 13 и 47 млн⁻¹ и 11 млн⁻¹ для фоновых содержаний морозных вздутий). То же самое наблюдалось и для серебра. Следовательно, ни никель, ни серебро не могут быть использованы как геохимические индикаторы оруденения, поскольку колебания их содержаний по зоне 47 больше, чем для фоновых проб. Средние стандартные отклонения и параметры, определяющие нормальность распределения этих микроэлементов в различных средах опробования представлены в табл. III. Резкие колебания отношения медь — марганец по «общим» пробам горизонта В почв зоны 47 и пробам с поверхности морозных вздутий на рудопроявлении 13 говорят о том, что марганец в районах вечной мерзлоты не может служить предпочтительным поглотителем катионов других металлов — во всяком случае меди — в базальтовом поясе Коппермайн-Ривер.

ВЫВОДЫ

О геохимических поисках в районе базальтового пояса Коппермайн-Ривер могут быть сделаны следующие выводы:

1. Медь активно рассеивается вокруг известных рудопроявлений как в механическом, так и растворенном состоянии.

2. Медь является наиболее эффективным индикатором обнаружения минерализации.

3. Озерные воды представляют собой весьма эффективную среду опробования при региональных поисках в тех случаях, когда одна из осей этих озер не менее 300 м.

4. Опробование донных осадков с шагом пробоотбора не более 300 м является наилучшим при полурегиональных геохимических поисках.

5. Детальное геохимическое опробование на перспективных участках, выявленных по результатам опробования донных осадков, геофизических и геолого-структурных исследований, эффективнее проводить путем отбора проб из илистого материала морозных вздутий с максимальным шагом пробоотбора 30 м.

6. Благодаря более широкой распространенности и однородности материала опробование участков морозного вздутия по сравнению с горизонтом В дает лучшие результаты.

Эти выводы, специфичные для базальтового пояса Кошпермайн-Ривер, однако, могут иметь более широкое применение при геохимических поисках в районах развития многолетней мерзлоты в целом. Можно рассчитывать, что применение геохимических методов при поисках в районах многолетней мерзлоты с учетом проблем, связанных с развитием ледниковых отложений, окажется столь же успешным, как и в любых других районах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Allan R. J., Brown J., Rieger S., Poorly Drained Soils with Permafrost in Interior Alaska, Pro. Soil Sci. Soc. Am., 33, 599—604, 1969.*
2. *Archer A. R., Main C. A., Casino, Yukon — A Geochemical Discovery of an Unglaciaded Arizona-type Porphyry, Proc. 3rd Int. Geochem. Explor. Symp., 1970.*
3. *Baragar W. R. A., The Geochemistry of the Coppermine River Basalts, Geol. Surv. Canada, Paper 69—44, 4, 1969.*
4. *Baragar W. R. A., Donaldson J. A., Coppermine and Dismal Lake Map-Areas, District of Mackenzie, in Report of Activities, April to October 1969, Geol. Surv. Canada, Paper 70—1, Pt. A, 120—125, 1970.*
5. *Boyle R. W., Geology, Geochemistry and Origin of the Lead-Zinc-Silver Deposits of the Keno Hill — Galena Hill Area, Yukon Territory, Geol. Surv. Canada, Bull. 111, 1965.*
6. *Boyle R. W., Cragg C. B., Soil Analyses as a Method of Geochemical Prospecting in the Keno Hill — Galena Hill Area, Yukon Territory, Geol. Surv. Canada, Bull. 39, 1957.*
7. *Boyle R. W., Illsley C. T., Green R. N., A Geochemical Investigation of the Heavy Metal Content of Streams in the Keno Hill — Galena Hill Area, Yukon Territory, Geol. Surv. Canada, Paper 54—18, 1954.*
8. *Boyle R. W., Illsley C. T., Green R. N., Geochemical Investigation of the Heavy Metal Content of Stream and Spring Waters in the Keno Hill — Galena Hill Area, Yukon Territory, Geol. Surv. Canada, Bull. 32, 1955.*
9. *Boyle R. W., Pekar E. L., Patterson P. R., Geochemical Investigation of Heavy Metal Content of Streams and Springs in the Galena Hill — Mount Haldane area, Yukon Territory, Geol. Surv. Canada, Bull. 36, 1956.*
10. *Brewer M. C., The Thermal Regime of an Arctic Lake, Trans. Amer. Geophys. Union, 39, № 2, 278—284, 1958.*
11. *Brown R. J. E., Permafrost in Canada, Map 1246A, Pub. № N.R.C. 9769, 1967.*
12. *Brown R. J. E., Permafrost in Canada, National Research Council, publ. by Univ. Toronto Press, 1970.*
13. *Brown W. G., Johnston G. H., Brown R. J. E., Comparison of Observed and Calculated Ground Temperatures with Permafrost Distribution Under a Northern Lake, Canada Geotech. Jour., 1, № 3, 147—154, 1964.*
14. *Burand W. M., A Geochemical Investigation of the Nenana Highway Area, Geochemical Report № 10, Alaska, Dept. Nat. Resources, Div. Mines Minerals, 1966.*
15. *Burand W. M., Geochemical Investigations of Selected Areas in the Yukon-Tanana Region, Alaska, 1965 and 1966, Geochemical Report № 13, Alaska, Dept. Nat. Resources, Div. Mines Minerals, 1968.*
16. *Burand W. M., Saunders R. H., A Geochemical Investigation of Minook Creek, Rampart District, Alaska, Geochemical Report № 12, Alaska, Dept. Nat. Resources, Div. Mines Minerals, 1966.*
17. *Claridge G. G. C., The Clay Mineralogy and Chemistry of Some Soils from the Ross Dependency, Antarctica, N.Z. Jour. Geol. Geophys., 8, 186—220, 1965.*
18. *Hornbrook E. H. W., Allan R. J., Geochemical Exploration Feasibility Study Within the Zone of Continuous Permafrost, Coppermine River Region, Northwest Territories, Geol. Surv. Canada, Paper 70—36, 1970.*
19. *Перельман А. И., Борисенко Е. Н., Очерки геохимии в зоне гипергенеза, Труды ИГЕМ, вып. 70, 30—99, 1962.*
20. *Pitulko V. M., Features of Geochemical Searches for Rare Metal Deposits in Permafrost Areas, Trans. Internatl. Geol. Rev., 11, № 11, 1239—1246, 1969.*
21. *Prest V. K., Grant D. R., Rampton V. N., Glacial Map of Canada, Geol. Surv. Canada, Map 1253A, 1967.*
22. *Shvartsev S. L., Some Investigations of Hydrochemical Conditions, Ore Deposit Geology, № 2, 100—110, 1963.*
23. *Стремяков А. Я., К вопросу применения гидрохимических поисков рудных месторождений в условиях многолетнемерзлых пород, Разведка и охрана недр, № 3, Госгеолтехиздат, 1958.*
24. *Tyrrell J. B., The Coppermine Country, Trans. Can. Min. Inst., 9, 201—222 (read to Institute Nov. 1911), 1913.*
25. *Ward F. N., Lakin H. W., Canney F. C., and others, Analytical Methods Used in Geochemical Exploration, U.S. Geol. Surv., Bull. 1152, 25—27, 1966.*
26. *Washburn A. L., Instrumental Observation of Mass-Wasting in the Mesters Vig District, Northeast Greenland, Meddelelser Om Grønland, Bd. 166, № 4, 1967.*

ПОВЕРХНОСТНОЕ РАЗУБОЖИВАНИЕ И ВЫЩЕЛАЧИВАНИЕ МОЛИБДЕНА

Дж. Дж. Бараксо
«Анаконда-Америкен-Брасс,
Британская Колумбия
Б. А. Бредшоу
«Копшер-рэндж-эксплорэйшн»,
Торонто, Онтарио, Канада

ВВЕДЕНИЕ

Новые вскрышные работы на трех месторождениях молибдена в западной части центра Британской Колумбии предоставили благоприятную возможность изучения степени гипергенного окисления и разубоживания молибдена в различных климатических условиях. Месторождение, разрабатываемое компанией «Молибденум», расположено недалеко от Алис-Арм на высоте 600 м над уровнем моря в районе с количеством осадков, превышающим 2500 мм в год. Окисление и выщелачивание минералов молибдена, с трудом отмечаемое в кернах скважин, легко обнаруживается в открытых выработках. Эти процессы распространяются на глубину до 9 м при отсутствии видимого ферримолибдита. Месторождение Берг, в 88 км к западу от Хьюстона, Британская Колумбия, расположено на высоте 1650 м над уровнем моря в районе, имеющем около 900 мм осадков в год. Процесс выщелачивания меди распространяется здесь до глубины 60 м, а окисление молибденита развивается только на первых 10 м. Месторождение Эндако, расположенное в 185 км к западу от Принс-Джорджа, находится на высоте 900 м, где количество осадков составляет около 400 мм в год. Минерализованные зоны большей частью скрыты под ледниковыми наносами, и окисление молибденита прослеживается только на глубину первых метров от поверхности.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ

Одно из разрабатываемых месторождений расположено в 10 км к югу от истока реки Алис-Арм, притока Обсервэйтори-Инлет, в 785 км северо-западнее Ванкувера. В тексте и на сопровождающих иллюстрациях это месторождение обозначено как Алис-Арм. Месторождение молибдена [3, 6] залегает в сложном гранитоидном штоке диаметром около 1 км, прорывающем граувакки и аргиллиты предположительно юрского возраста. Центральная часть штока сложена кварцевыми монцонитовыми порфирами, постепенно переходящими в его краевых частях в кварцевые диориты. Граувакки и аргиллиты,

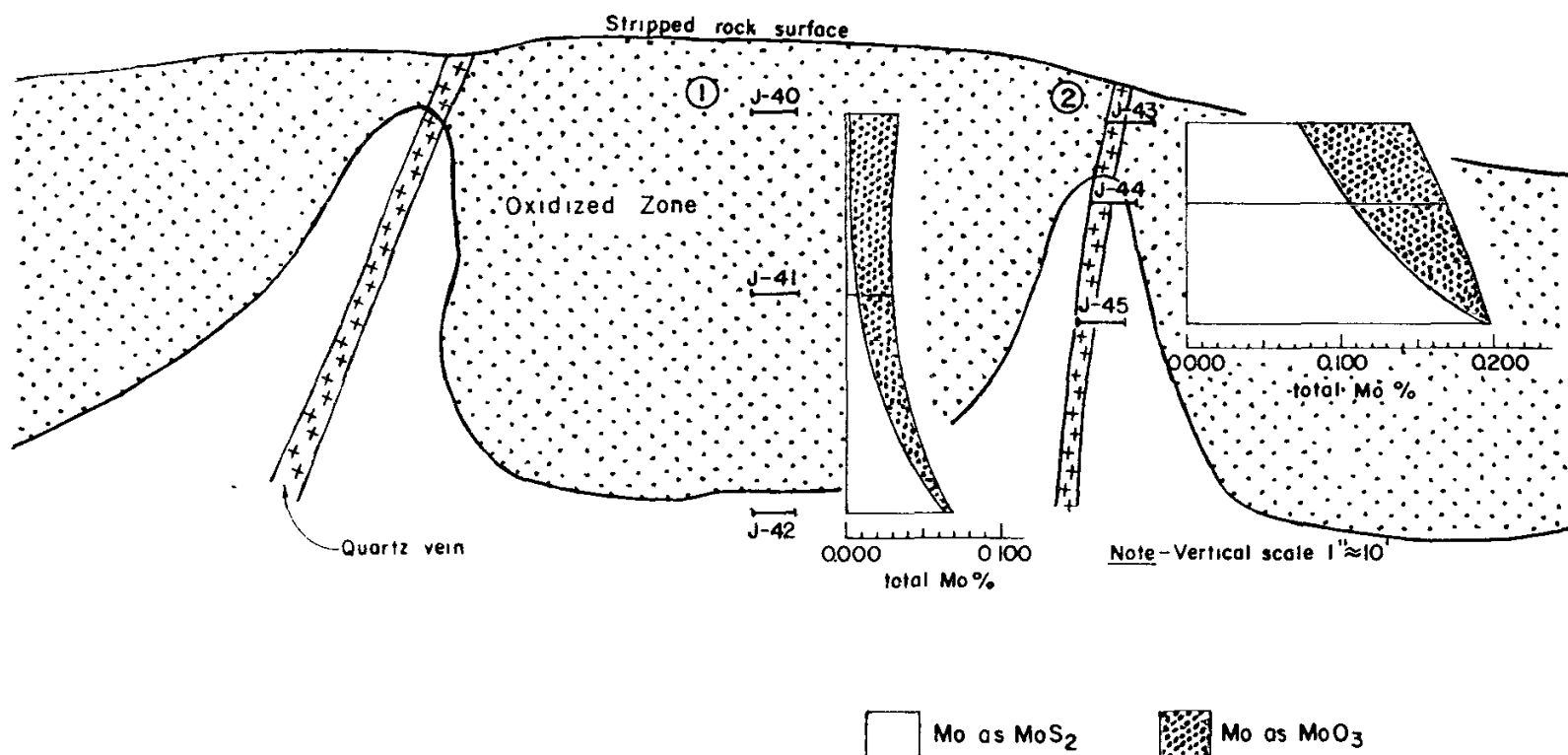
вмещающие шток, превращены в биотитовые роговики. Рудоносные зоны располагаются в периферических частях штока и вмещающих биотитовых роговиках.

Минерализация представлена молибденитом, пиритом, галенитом, сфалеритом, в небольших количествах встречается шеелит, еще реже тетраэдрит, халькопирит, пирротин, повеллит, козалит и другие сопутствующие минералы. Все они приурочены к штокверку кварцевых жил мощностью 3—12 мм. Молибденит встречается, кроме того, в виде пленок и прожилков толщиной до 12 мм вдоль плоскостей сколов и трещин, реже как цементирующее вещество брекчий. Рассеянный молибденит во вмещающих породах редок.

Размеры близповерхностного выщелачивания не оценивались до того, как была сделана вскрыша. На верхнем уступе 9-метровая зона окисления представлена лимонитом, окислами марганца и очень редко ферримолибдитом. Глубина окисления различна и зависит от количества трещин и степени окремнения.

Месторождение Берг расположено в Татса-Рэндж, в 10 км к северу от озера Татса и в 215 км к юго-востоку от месторождения Алис-Арм. Молибденитовая минерализация [8] ассоциирует с двумя небольшими плутонами кварцевых диоритов и кварц-монцонитовых порфиров и с трубками брекчий кварц-монцонитовых порфиров. Они прорывают туфы свиты Хацелтон, вулканогенные песчаники и сланцы среднеюрского возраста, которые превращены в роговики на несколько десятков метров от контакта с порфирами.

Первичные минералы — халькопирит, молибденит и пирит с малым количеством сфалерита и галенита — выполняют прожилки с большим или меньшим количеством кварца в тонкосетчатых штокверках. Найдено всего несколько кварц-молибденитовых жил мощностью до 60 см. Первичные минералы окислены и выщелочены, частично развиты примазки вторичного халькозина. Глубина выщелачивания связана с рельефом, а также с современным и древним уровнем грунтовых вод. В междуречьях мощность выщелоченных пород может превышать 60 м, а вторичная минерализация



ФИГ. 1. Размещение бороздовых проб (уступ 2190 футов), месторождение Алис-Арм.

распространяется на глубину более 120 м. Окисление молибденита в ферримолибдит наблюдается до меньшей глубины, чем та, до которой выщелочен халькопирит. Гипергенный халькозин образует пленки на рассеянном пирите.

Рудное тело компании «Эндако-майнс» находится севернее восточного края озера Франсуа, в 184 км к западу от Принс-Джорджа и в 154 км к востоку от месторождения Берг [5].

Породами, вмещающими рудную минерализацию, являются кварцевые монзониты Эндако (одна из фаз интрузии Топли нижнеюрского или более молодого возраста). Рудная зона представлена системой параллельных минерализованных кварцевых жил внутри штокверка более мелких жилок и трещин. Характерно, что крупные жилы достигают нескольких сотен метров в длину при мощности от 10 см до 1,5 м. Молибденит почти весь заключен в прожилках и трещинах, реже он наблюдается в виде утолщенных пленок; еще реже попадаются тонкозернистые прослой и рассеянный молибденит. С ним ассоциирует пирит, развивающийся над рудным телом как в виде вкрапленности, так и по трещинам. Местами в жилах встречаются магнетит и гематит, а халькопирит очень редок.

МЕТОДЫ ОТБОРА И АНАЛИЗА ПРОБ

Месторождение Алис-Арм. Пробы отбирались в двух участках уступа 2190 (восточная часть карьера). Шесть трехметровых бороздо-

вых проб с различной глубины и с разной степенью окисления показаны на фиг. 1 черточками.

Месторождение Эндако. Два участка взятия образцов расположены с южной стороны восточного карьера на горизонте 3260 футов и один участок — в северо-восточной части карьера на горизонте 3300 футов уступа. Бороздовые пробы (см. фиг. 5) были взяты тем же способом, что на месторождении Алис-Арм.

Месторождение Берг. Две бороздовые пробы отобраны в дорожной выемке тем же способом, что и предыдущие (см. фиг. 6). Однако на этом месторождении в бороздовые пробы не попали первичные руды. По этой причине был использован один из образцов керна скважины, которая смещена на 10 м к северу от места взятия пробы с поверхности. Каждая проба в этом случае представлена трехметровым отрезком керна, а первичные руды получены с глубины 40 м (проба КХ13976).

Все пробы подготовлены и проанализированы лабораторией Кеннко в северном Ванкувере на молибден, марганец и медь методом атомной абсорбции. Кроме того, выполнены анализы на общее и выщелачиваемое серебро (с использованием 5% раствора лимоннокислого аммония в соотношении 1 : 1). Окисное и закисное железо определены колориметрически, а общее количество сульфидов — методом тяжелых жидкостей. Все значимые результаты сведены в табл. III.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты количественного анализа молибдена по месторождению Алис-Арм нанесены на фиг. 1. Здесь ясно вырисовывается поверхность выноса молибдена, особенно MoS_2 . Общее содержание молибдена может понизиться более чем на 50%, от 0,070% до 0,030%.

Было получено несколько концентратов лимонита, которые проверялись на установке для дифференциального термического анализа на содержание в них ярозита и гётита. Образцы и фракции лимонита были посланы в лабораторию для рентгеновской и электронно-дифракционной идентификации продуктов окисления молибденита.

Дифференциальный термический анализ показал отсутствие ярозита и лишь следы гётита. Образцы лимонита проверялись с помощью рентгеновской дифракции. Ни ярозит, ни гётит не были обнаружены, а то, что принимали за ярозит, при рентгеновском анализе оказалось церусситом.

На месторождении Алис-Арм в условиях влажного климата тип выщелачивания молибдена и меди различен. При этом нет никакой зависимости между содержанием молибдена и содержанием ярозита и гётита.

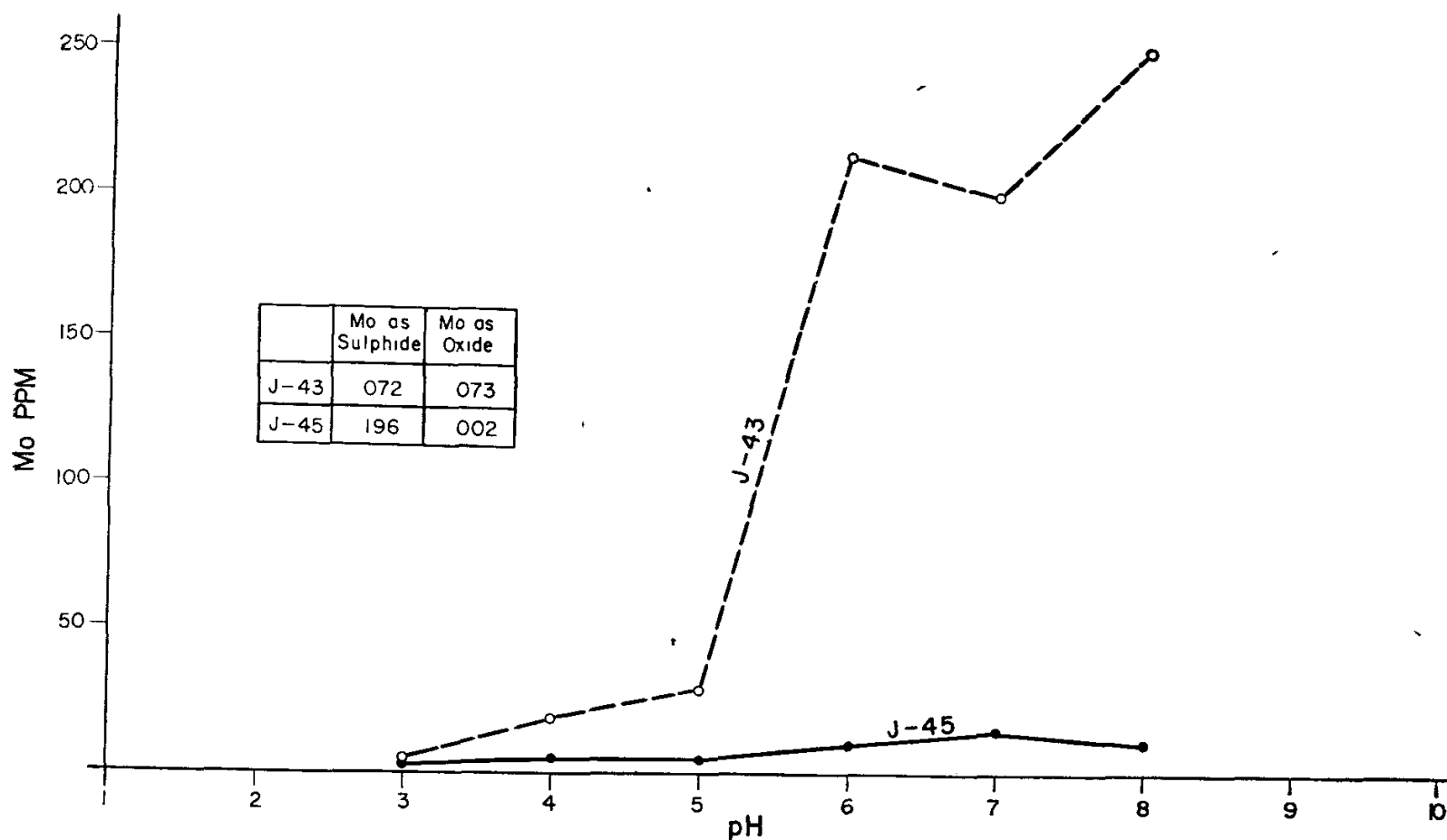
Рентгеноструктурные и электронно-дифракционные определения лаборатории Леджемонт

показали, что большинство молибденовых окислов аморфно. Существует возможность наличия молибденсодержащих гидроокислов железа. Фаза шпинели, известная как Берг-Х, была отмечена в некоторых налетах и идентифицирована в одном образце с помощью электронной дифракции. Желтый порошок одного из налетов с помощью рентгеновской дифракции был определен как церуссит с примесью сфалерита и кварца. Методом электронной дифракции обнаружен, вероятно, новый минерал $\zeta\text{FeO}(\text{OH})$ (данные Мариано).

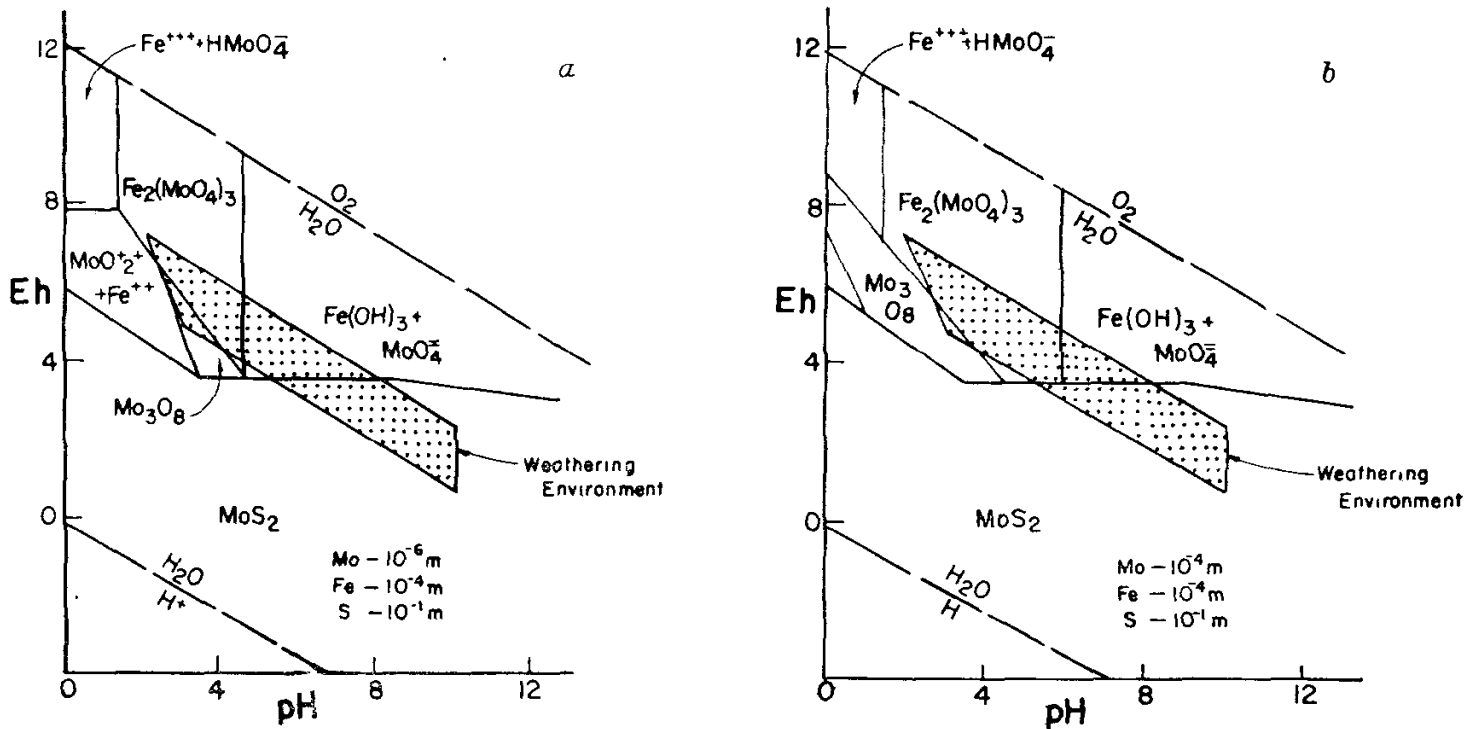
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОБ ВОДЫ

В карьере Алис-Арм было отобрано пять проб воды с той же общей площади, что и пробы пород. В них определялись рН, Eh и содержание молибдена. Часть проб воды и образцы осадка были отданы Совету по исследованиям Британской Колумбии для бактериального анализа.

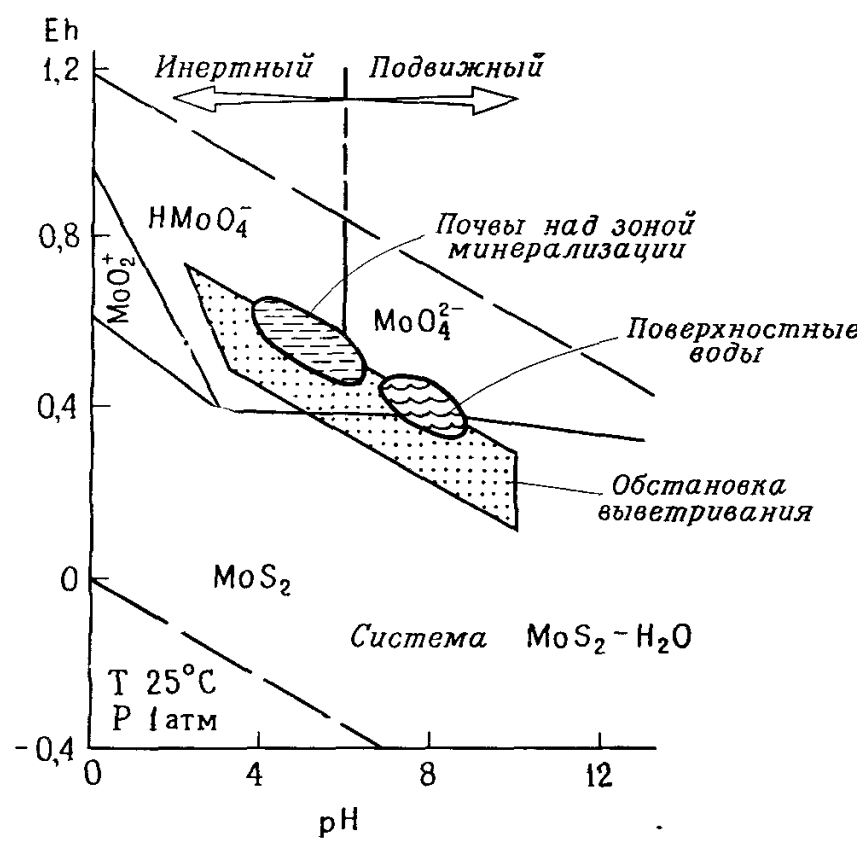
Анализы проб воды с поверхности с рН около 6,5 и Eh, измеренными в лаборатории, от 0,45 до 0,47 В показывают, что не весь выщелоченный молибден находится в истинном растворе. В пробах воды обнаружены коллоидные суспензии, которые дают до 12 млн^{-1} общего Мо в воде. Eh-рН-условия на месторождении Эндако не были изучены, так как удалось взять



ФИГ. 2. Выщелачивание молибдена из истертых проб при различных рН за 24 ч.



ФИГ. 3. Реакционные диаграммы Eh — pH системы Mo — S — Fe — H₂O при 25° С и 1 атм (по Татлу, с изменениями).
 а — при отношении Мо : F, равном 1 : 100; б — при отношении Мо : Fe, равном 1 : 1 Показанная точками площадь — обстановка выветривания.



- Соединения молибдена
- Ионы
- MoO₄⁻² — молибдат-анион
 - HMoO₄⁻ — кислый молибдат-анион
 - MoO₂⁺² — катион молибдена
- Окислы
- Mo₂O₈ — ильсеманнит?
 - Fe₂(MoO₄)₃ — ферримолибдит
- Сульфиды
- MoS₂ — молибденит
- Соединения железа
- Ионы
- Fe²⁺ — катион закисного железа
 - Fe³⁺ — катион окисного железа
- Окислы
- Fe(OH)₃ — «лимонит»
 - Fe₂(MoO₄)₃ — ферримолибдит

ФИГ. 4. Относительная подвижность молибдена в условиях рассеяния, типичных для юго-западной части США [7].

только одну пробу воды. Зато на месторождении Берг в 1967 г. одиннадцать точек были опробованы несколько раз. Они показали следующие средние значения вокруг минерализованной зоны: pH 3,1—5,9, Eh 0,40—0,90 В.

Колебания pH и Eh являются возможными показателями степени окисления и растворимости молибдена и могут оказаться критерием при оценке молибденовых месторождений.

Бактериальные исследования, проведенные Советом по исследованиям при департаменте минеральной биологии Британской Колумбии, показывают наличие нескольких видов бактерий в четырех из пяти проб воды. Последние исследования образцов пород подтвердили это, а один из штаммов бактерий был определен как *Thiobacillus Ferrooxidans*. Этот штамм морфологически отличается от нормального типа.

«...по этим результатам сделано заключение, что бактерии, известные как *Thiobacillus Ferrooxidans*, присутствовали во всех образцах, присланных вами, и они бесспорно играют какую-то роль в преобразовании сульфидной минерализации. В выделенном штамме бактерии были морфологически мельче, чем обычно, но после роста в нашей лаборатории они вскоре достигли нормальных размеров...» Дункан (Отчет Совета по исследованиям Британской Колумбии, январь, 23/68).

Присутствие серных бактерий в ядовитой молибденовой среде необычно. Бактерии могут вызывать окисление молибденита, как это отмечалось на месторождении Берг. Прежние данные по этому месторождению, а также лабораторные опыты вместе с результатами настоящего исследования позволяют предполагать, что окисление молибденита является результатом деятельности бактерий. Они могут не питаться молибденитом непосредственно, но продукты их жизнедеятельности, вероятно, катализируют окисление этого минерала. Коль скоро еще имеется и достаточное количество железа, значительная часть молибдена связывается либо в железосодержащие молибденовые окислы, либо в молибденсодержащие гидроокислы железа. При этом сера освобождается и служит для питания серных бактерий.

Подвижность молибдена в поверхностных условиях может быть объяснена исходя из природной химической обстановки. Хэнсалд [7], приводя в последней статье две Eh-pH-диаграммы состояния системы Mo — S — Fe — H₂O (фиг. 3), констатирует:

«...На этих диаграммах фигурируют четыре твердые фазы: первичный молибденит и три продукта его окисления — голубой ильсеманнит, желтый ферримолибдит и коричневая до оранжевой молибденсодержащая гидроокись железа.

Жирная черная линия изображает величину потенциала реакции окисления молибденита, т. е. это минимальный потенциал, при котором молибденит будет активно окисляться. Соотношение стабильных фаз показывает, что в условиях повышенной кислотности молибденит окисляется в ферримолибдит, тогда как в условиях от слабо кислой до щелочной среды он образует молибденсодержа-

щую гидроокись железа. Что именно будет формироваться — ферримолибдит или молибденсодержащие окислы железа, — является главным образом функцией pH и не зависит от количества присутствующего молибдена.

Фиг. 4 показывает, что в кислой среде почв молибден находится в форме малоподвижного кислого молибдата (HMoO₄⁻) и в основном фиксируется на месте особенно в присутствии достаточного количества железа. В щелочных поверхностных водах молибден встречается в форме подвижного аниона (MoO₄²⁻) и выносится в растворах.

Химические особенности окисления молибденита были недавно изучены несколькими сотрудниками; хорошая сводка по этой работе приведена Карпентером [4]. Формирование различных разновидностей ферримолибдатов в зависимости от величины pH показано в табл. I.

Так, на месторождении Алис-Арм в умеренно кислой среде, создаваемой кислотой, образующейся при окислении пирита, молибденит окисляется и образует в основном продукты B, C, D и E. Они представляют собой аморфные формы гидратированного ферримолибдита. Затем в условиях высокого уровня воды при обильных осадках pH грунтовых вод поднимается до 6,5 и даже выше и молибден будет входить в подвижный молибдат-анион MoO₄²⁻ (железо в таблице I) и сможет выноситься растворами.

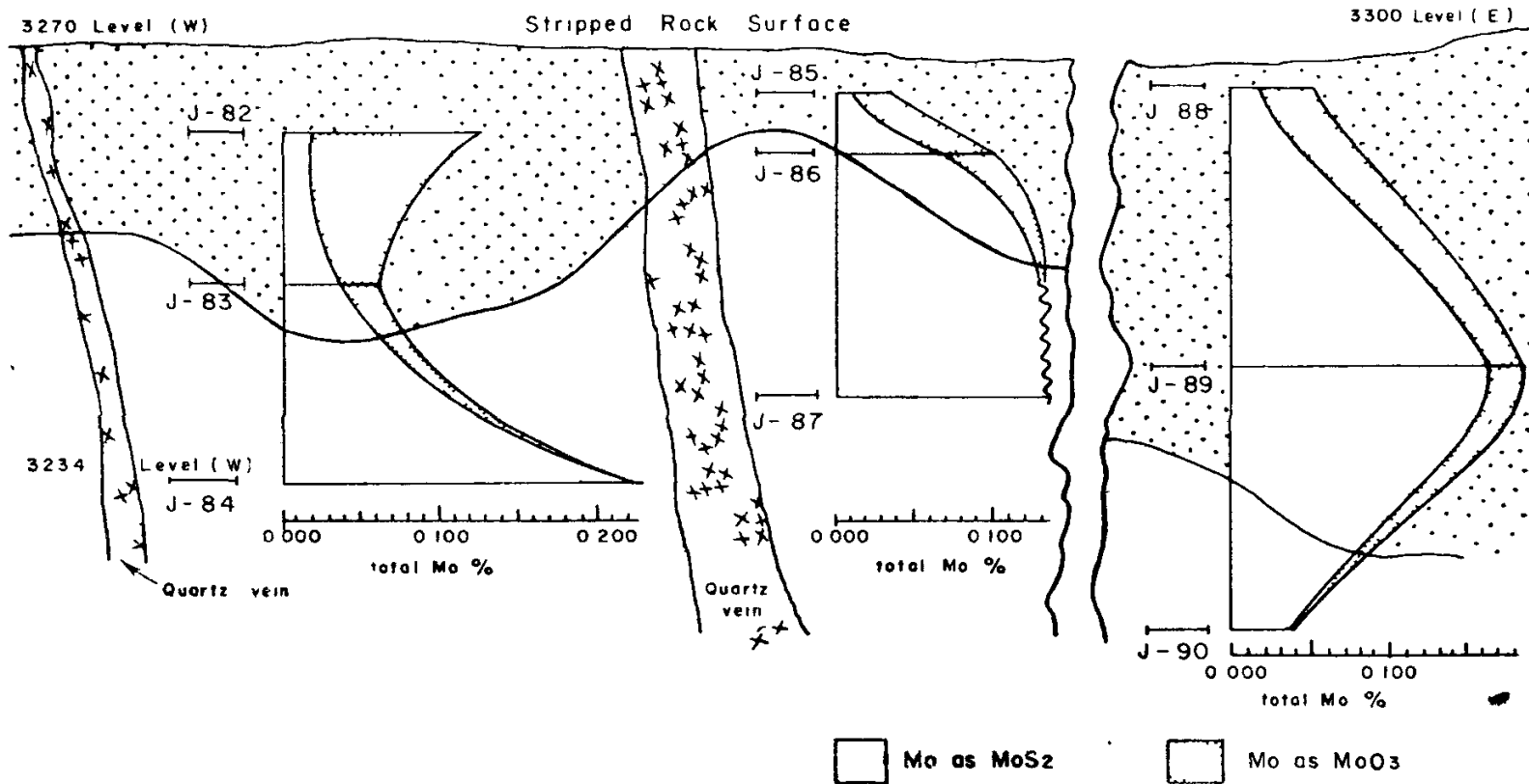
Подобные реакции окисления и осаждения в какой-то мере происходили и на месторождениях Эндако и Берг. На месторождении Эндако (фиг. 5), которое содержит наименьшее общее количество сульфидов, масштабы окисления также минимальные. Аналогично более низкие значения pH (4,5—5,1) определяют более низкую растворимость соединений молибдена. Однако разубоживание молибдена отмечается скорее на участках с характерным рельефом и составом пород, чем в местах, отличающихся по климатическим или химическим факторам. Лучшие примеры находок молибденовой охры наблюдаются именно в таких местах.

Таблица I

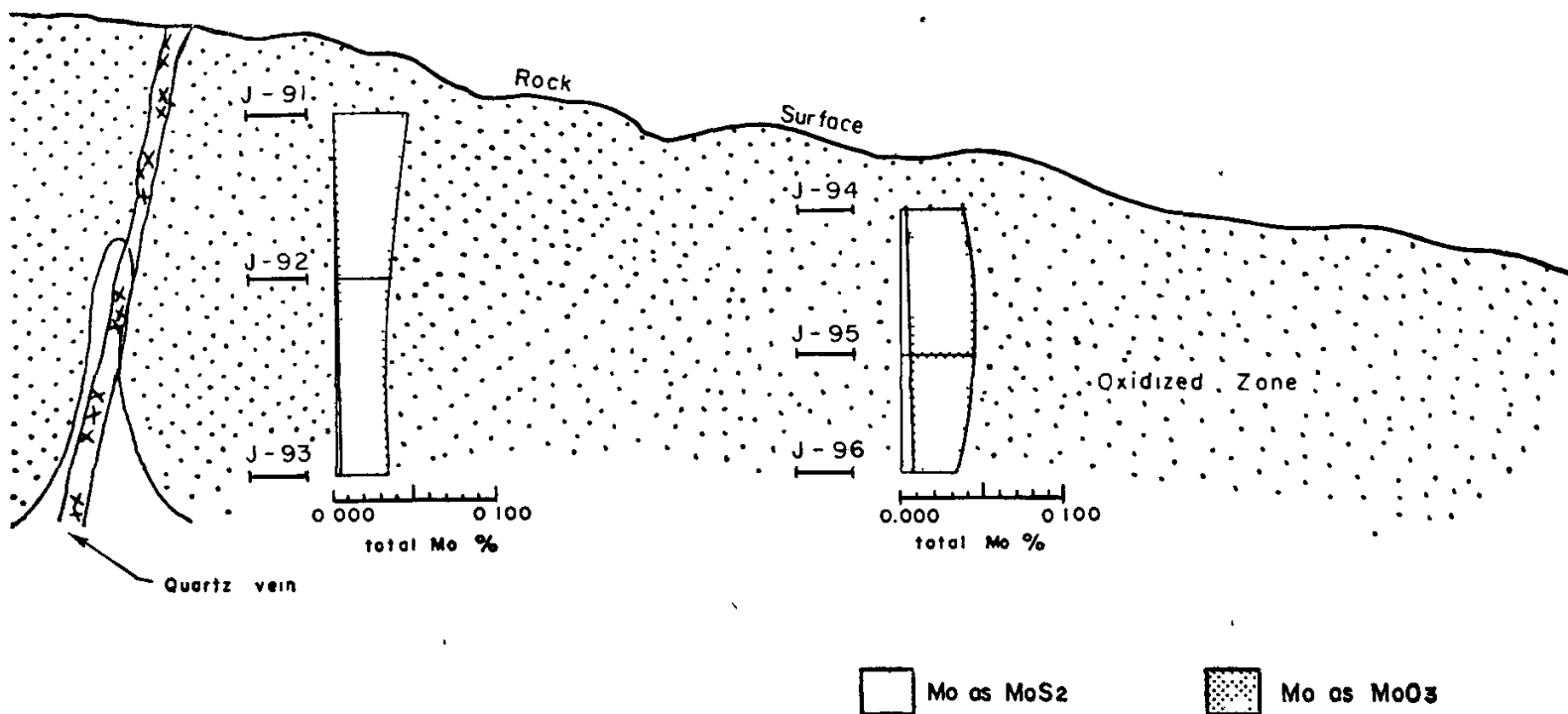
Вариации отношений Fe₂O₃ : MoO₃ : H₂O в зависимости от pH осаждения

pH	Преобладающие виды соединений	Предполагаемые продукты	Отношение Fe ₂ O ₃ : MoO ₃	Обозначение
1,0	Fe ³⁺ + 3HMoO ₄ ⁻	= Fe (HMoO ₄) ₃	1 : 6	A
1,0—1,6	Fe(OH) ²⁺ + 2HMoO ₄ ⁻	= Fe(OH) (HMoO ₄) ₂	1 : 4	B
2,5—6,2 (а)	Fe(OH) ₂ ⁺ + HMoO ₄ ⁻	= Fe(OH) ₂ (HMoO ₄)	1 : 2	C
2,5—6,2 (б)	Fe(OH) ₂ ⁺ + (OH) ⁻	= Fe(OH) ₃	1 : 0	D
3—n (в)	Fe(OH) ₃ + (3—n) (HMoO ₄ ⁻ + (3—n)H ⁺)	= Fe(OH) _n (HMoO ₄) _(3—n) ⁻ + (3—n)H ₂ O		E
6,2 +	Fe(OH) _n (HMoO ₄) _{3—n} + (3—n)H ₂ O	= Fe(OH) ₃ (3—n) (MoO ₄) ²⁻ + 2(3—n)H ⁺		F

Примечание. Значения pH, обозначенные (а), (б), (в), зависят от активности железа [4].



ФИГ. 5. Размещение бороздовых проб на руднике Эндако.



ФИГ. 6. Размещение бороздовых проб на месторождении Берг.

Рудное тело Берг представляет собой природную лабораторию, снабжающую интересными примерами окисления и выщелачивания (фиг. 6). Из трех рассматриваемых месторождений оно имеет наиболее высокое общее содержание сульфидов. Процесс окисления меди прослеживается до глубины первых сотен метров, окисление молибдена отмечается только до глубин 12—15 м. Значения pH обычно низки (<4,5), и большое количество железа находится в виде молибденовых комплексов. Мобилизация молиб-

дена обычно происходит как передвижение ионных комплексов и минералов в твердой фазе. По причине меньшего количества годовых осадков процесс мобилизации на месторождениях Берг и Эндако не достигает конечных фаз, так как подвижность соединений становится слишком низкой.

ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЮ

Для изучения влияния окружающей среды на процесс разубоживания молибдена было про-

Таблица II

Эксперименты по выщелачиванию молибдена

	Номер эксперимента							Валовое содержание Мо в пробе, млн-1	MoO ₃ , млн-1
	1	2	3	4	5	6	7		
	Выщелоченный Мо, млн-1								
J-40	3	21	50	37	100	14	5	340	320
J-41	1	11	50	40	47	27	5	300	220
J-42	0	5	7	6	6	5	0	700	50
J-43	7	22	73	110	145	64	11	1450	730
J-44	9	38	73	120	145	70	15	1690	640
J-45	1	9	22	12	15	5	2	1980	20

1. Дистиллированная H₂O (pH=4,5).
2. При pH, доведенном до 8,0 в присутствии Fe³⁺.
3. При pH, доведенном до 8,0 добавлением насыщенного раствора CaO.
4. При pH, доведенном до 8,0 добавлением насыщенного раствора CaCO₃.
5. При pH, доведенном до 8,0 добавлением насыщенного раствора Na₂CO₃.
6. Na₃PO₄ + 1 мл 0,1 N дубильной кислоты при pH = 8,0.
7. CaCO₃ + 1 мл 0,1 N дубильной кислоты.

ведено небольшое число лабораторных опытов. Наиболее простой эксперимент по выщелачиванию молибдена был проведен сначала на двух образцах: богатой окислами пробе из средней по глубине борозды и бедном окислами образце из самой глубинной (донной) бороздовой пробы месторождения Алис-Арм (см. фиг. 1). Измельченные образцы пород выщелачивались в течение 24 ч при различных значениях pH. Результаты свидетельствуют о заметном возрастании растворимости Мо при значениях pH между 5 и 6.

Позже были начаты более сложные серии экспериментов с использованием всех проб месторождения Алис-Арм с целью изучить изменение подвижности молибдена в нейтральных условиях (табл. II). Эксперименты проводились с пробами весом 5 г в 50 мл воды с использованием колб Эрленмейера объемом 125 мл. Пробы перемешивались в течение 24 ч при комнатной температуре, затем фильтровались и замерялись. Эксперимент 1 показал, что после окисления молибденита при pH = 4,5 молибден захватывался молибденсодержащими гидроокислами железа, а незначительное количество его выщелачивалось. В эксперименте 2, где pH повысили до 8,0, даже при избытке иона закисного железа было освобождено от 5 до 6% окиси молибдена. Поскольку в рудах Алис-Арм полевые шпаты распространены широко, а содержание кальция в некоторых образцах превышает 1%, эксперименты 3 и 4 проводились с целью получить какие-либо данные о роли кальция, а эксперименты 5 и 6 — о роли натрия в этом процессе. Поскольку площадь месторождений сильно залесена и почвы содержат много орга-

ники, в экспериментах 6 и 7 использовались растворы дубильной кислоты как наиболее легко доступной органической кислоты.

В этих экспериментах заметно влияние других катионов на подвижность молибдена. Эксперименты показывают, что, после того как ферримоллибдаты или аморфные гидраты разрушены (при возрастании pH выше 6,2), подвижность молибдена все еще зависит от взаимодействия между другими ионами и возможности захвата ими, и процесс выщелачивания усиливается.

Один из подобных экспериментов был задуман для воспроизведения природных значений pH и Eh в лаборатории. Это, однако, не удалось, поскольку трудно поддерживать точное значение pH и особенно Eh в условиях геохимической лаборатории производственного типа.

Похожие эксперименты по выщелачиванию были частично осуществлены на нескольких сериях образцов с месторождения Берг. Результаты подтвердились.

Из результатов аналитических исследований следует, что отношение общего серебра к выщелоченному (где выщелоченное серебро должно быть представлено вторичными серебряными минералами) может быть количественным геохимическим параметром процесса выщелачивания. Результаты более ранних геохимических работ показывают, что серебро выщелачивается в меньшей степени, чем другие элементы, даже когда оно находится в форме вторичных минералов, таких, как самородное серебро, хлорид серебра и ярозит, содержащий серебро. Они малоподвижны и фиксируются в окисленных и выщелоченных породах зоны окисления в больших количествах, чем другие металлы.

Таблица III

Выборочные аналитические данные по профилям опробования

Номера проб	Валовое содержание Mo, %	Окислы Mo, %	Cu, млн-1	Валовое содержание Ag, млн-1	Выщелачиваемое Ag, млн-1	Ag вал./Ag выщел.	Общее Fe, %	Fe ²⁺ , %	Fe ³⁺ , %	Fe ²⁺ /Fe ³⁺	Валовое содержание сульфидов, %	Валовое содержание FeS, %
Алис-Арм												
J-40	0,034	0,032	80	22,3	4,3	5,18	1,35	1,29	0,06	21,50	0,16	0,124
J-41	0,030	0,022	91	2,8	1,0	2,80	0,80	0,76	0,04	19,00	0,36	0,473
J-42	0,070	0,005	50	0,3	0,0	0	0,60	0,67	0,08	8,37	0,77	1,149
J-43	0,145	0,073	39	5,4	2,6	2,07	2,32	2,93	0,07	41,85	1,95	0,665
J-44	0,169	0,064	45	5,2	0,2	26,0	0,92	1,51	0,04	37,75	1,20	0,794
J-45	0,198	0,002	62	3,9	0,0	0	0,80	1,80	0,01	180,00	1,20	0,666
Эндако												
J=82	0,126	0,102	33	0,9	0,2	4,50	1,00	0,90	0,16	6,19	0,04	0,045
J=83	0,064	0,024	6	0,7	0,1	7,00	0,75	0,70	0,05	14,00	0,05	0,071
J=84	0,227	0,002	14	0,7	0,1	7,00	0,95	0,93	0,03	31,00	0,59	0,634
J=85	0,031	0,020	15	0,7	0,1	7,00	1,55	1,50	0,08	18,75	< 0,01	< 0,006
J=86	0,100	0,013	25	0,7	0,1	7,00	1,35	1,30	0,05	26,00	0,27	0,207
J=87	0,227	0,002	14	0,4	0,1	4,00	1,00	0,97	0,03	32,33	0,34	0,351
J=88	0,049	0,031	14	0,9	0,2	4,50	1,10	0,93	0,07	13,28	< 0,01	< 0,010
J=89	0,180	0,016	14	0,7	0,1	7,00	1,20	1,15	0,05	23,00	0,39	0,339
J=90	0,035	0,002	26	0,7	0,1	7,00	1,25	1,11	0,14	8,14	0,22	0,198
Берг												
J=91	0,048	0,047	160	11,0	6,5	1,70	1,75	1,47	0,28	5,24	< 0,01	< 0,006
J=92	0,038	0,036	123	6,1	1,2	5,60	1,25	1,00	0,25	4,00	< 0,01	< 0,010
J=93	0,032	0,026	63	7,3	3,0	2,43	1,60	1,58	0,02	79,00	< 0,01	< 0,006
J=94	0,039	0,037	210	8,4	4,0	2,10	1,45	1,35	0,30	4,50	< 0,01	< 0,007
J=95	0,045	0,041	195	7,1	2,1	3,30	1,25	1,20	0,02	60,00	0,02	0,016
J=96	0,032	0,026	280	6,9	2,0	3,45	1,80	1,65	0,05	33,00	0,05	0,031
KX13963												
64	0,031	0,026	200	8,6	6,0	1,43	1,30	1,16	0,14	8,28	< 0,01	< 0,008
65	0,048	0,042	176	9,1	6,1	1,49	1,85	1,77	0,08	22,12	< 0,01	< 0,007
66	0,030	0,030	300	7,7	2,2	3,50	1,35	1,26	0,09	140,00	< 0,01	< 0,008
67	0,031	0,031	100	5,7	2,0	2,85	1,90	0,85	0,05	17,00	< 0,01	< 0,012
68	0,031	0,031	200	4,9	0,7	7,00	1,40	1,30	0,10	13,00	0,01	0,008
68	0,025	0,024	150	3,7	0,8	4,60	1,05	0,99	0,06	16,50	< 0,01	< 0,011
KX13976	0,070	0,055	500	4,2	0,1	42,00	1,85	1,10	0,05	22,00	0,60	0,545

Это совершенно справедливо и для данного исследования, за исключением материалов по месторождению Эндако, где содержание серебра так низко, что истинные отношения установить трудно.

Отношение ионов закисного железа к окисному было изучено, чтобы посмотреть, не будет ли оно служить показателем степени окисления руд (см. табл. III). Но отношение изменяется непоследовательно и не может использоваться для уверенных выводов. Более надежным показателем может оказаться отношение общего количества сульфидов к закисному железу.

ВЫВОДЫ

Поверхностное разубоживание молибдена на месторождениях Алис-Арм, Эндако и Берг является результатом процесса выщелачивания. Окислению молибдена способствует деятельность бактерий. Опробование поверхности и анализ только на общий молибден не дает представления о степени окисления зоны. Отсутствие ферримолибдита или ильсеманнита в выщелоченных породах с поверхности не свидетельствует однозначно об отсутствии значительной минерализации на глубине. Главные факторы, влия-

ющие на разубоживание молибдена, следующие:

1. Количество сульфидов, которые контролируют степень и глубину окисления (освобождаемая сера служит источником энергии для бактерий рода *Thiobacillus*).

2. Соотношение Eh — рН, которые контролируют подвижность молибдена.

3. Количество окислов железа и других ионов, способных к захвату и (или) взаимодействию с различными формами ионов молибдена.

4. Количество осадков, которое оказывает как непосредственное, так и косвенное влияние на процесс выщелачивания. С одной стороны, большее количество воды будет выщелачивать больше ионов молибдена, с другой — возрастание количества воды будет повышать рН и этим способствовать освобождению большего количества таких ионов, как Са, Fe, Na, Ва и сложные органические ионы.

Все эти факторы, каждый в отдельности

или взаимосвязанно, определяют разубоживание молибдена в данной обстановке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Barakso J. J., re-analysis in four laboratories of some previously collected and analysed rock samples, memorandum to J. A. Gower, October 9, 1963.
2. Barakso J. J., possibility of using silver as a tool in geochemistry, memorandum to J. A. Gower, June 13, 1966.
3. Bradshaw B. A., Alice Arm Project, Engineering Report, British Columbia Molybdenum Limited, 1964.
4. Carpenter R. H., Geology and Ore Deposits of the Questa Molybdenum Mine Area, Taos County, New Mexico, 1311—1327, in Ore Deposits in the United States 1933—1967, AIME, 1968.
5. Carr J. M., Min. of Mines & Pet. Resources, Prov. of B.C., Ann. Rept. 1965, 114—135, 1965.
6. Carter N. C., Min. of Mines & Pet. Resources, Prov. of B.C., Ann. Rept. 1964, 30—36, 1964.
7. Hansuld J. A., Behavior of Molybdenum in Secondary Dispersion Media, Mining Engineering Journal, 18, № 12, 1966.
8. Sutherland-Brown A., Min. of Mines & Pet. Resources, Prov. of B.C., Ann. Rept. 1966, 105—112, 1966.

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПРИ ПОИСКАХ СКРЫТЫХ УРАНОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

С.Х.У. Бовье,
Т. К. Болл, Д. Остл
Институт геологических наук,
Лондон

ВВЕДЕНИЕ

Геохимические методы поисков, с помощью которых устанавливают отклонения концентраций элементов от обычных содержаний как в коренных породах, так и в рыхлых отложениях, в настоящее время разработаны достаточно хорошо. Однако еще сравнительно недавно химические методы определения первичного и вторичного распределения урана при поисках урановых месторождений, за некоторыми исключениями, недооценивались. Это объяснялось тем, что радиометрические методы — простые и быстрые — достаточно чувствительны для выявления концентраций урана, имеющих практическое значение. Чувствительные гамма-радиометры, снабженные счетчиком Гейгера — Мюллера или сцинтиллятором, рассматривались как основной «геохимический» инструмент при поисках урана.

Отмечалось [15], что определение содержания урана в водах — хороший поисковый метод, особенно в труднодоступных районах. Развитие этого метода в начале затруднялось отсут-

ствием высокоточных аналитических способов определения низких содержаний урана, а когда они были разработаны [18, 20, 22] — снизившимся интересом к поискам урана.

Возобновление заинтересованности в выявлении дополнительных запасов урана за последние три года привело к переоценке всех имеющихся методов и в особенности к разработке методов, позволяющих обнаруживать скрытые месторождения урана, не проявленные на поверхности радиометрически. Это повысило значение методов, устанавливающих самое незначительное рассеяние элементов вокруг материнских рудных тел. Элементами, специфичными для урановых месторождений, являются сам уран и газообразный продукт его распада ^{222}Rn . Поэтому основные усилия были направлены на исследования закономерностей рассеяния этих элементов и развитие точных методов определения их содержаний. Обычно некоторые месторождения урана образуются в комплексе с теми или иными металлами. При этом возникают характерные геохимические ассоциации, обеспечивающие возможность разработки эф-

эффективных методов поисков по элементам-индикаторам, что соответственно представляет собой еще одно перспективное направление в разработке поисковых методов.

Для открытия месторождений урана особенно применимы по теоретическим представлениям геохимические методы поисков, поскольку уран обладает высокой растворимостью по сравнению с большинством других металлов. Это относится главным образом к зоне окисления, где более растворимый шестивалентный ион легко переносится в водном растворе и рассеивается в почвах и донных осадках. Но поскольку добыча урана экономически выгодна и при относительно низких концентрациях, необходимы методы определения очень малых его содержания в грунтовых и поверхностных водах, а также в донных осадках. Необходимо достигнуть высокой степени точности определения урана в почвах, где его содержания могут быть лишь незначительно выше фонового (мода).

Химические методы определения урана при поисках подразделяются на две основные группы.

1. Прямые методы, при которых уран определяется непосредственно в различных средах, включая воду, почвы, донные осадки, ледниковые отложения и торф.

2. Косвенные методы, направленные на определение аномальных концентраций продуктов радиоактивного распада урана или его элементов-индикаторов.

ПРЯМЫЕ МЕТОДЫ

Аналитические методы. Для получения надежных результатов химическими методами определения урана при низких уровнях концентраций обычно необходимо удалить элементы, мешающие его определению. Трудности, возникающие в процессе анализа, весьма различны в зависимости от типа проб и степени концентрации урана.

Описано множество методов определения содержания урана в горных породах, но не все они пригодны для анализа проб при геохимических поисках. Гамма-спектрометрия может быть удовлетворительным методом для непосредственного определения урана. Она применима также при наличии равновесия между ураном и продуктами его распада, но непригодна для анализа почв, донных осадков и выветрелых пород. Появление в недавнее время кристаллических высокоразрешающих счетчиков и усовершенствованных многоканальных импульсных анализаторов сделало возможным непосредственное определение урана в пробах, где

равновесие нарушено. Однако малочисленность отсчетов в уранопределяющих каналах ограничивает точность результатов содержанием около 100 млн^{-1} , кроме того, продолжительность получения данных исключает применение этого метода для экспрессного анализа проб (личное сообщение Лусмора из Научно-исследовательского центра по изучению атомной энергии в Харуэлле).

Вследствие слабого спектра уран не может удовлетворительно определяться в почвах и породах методами оптической эмиссионной спектрометрии. Однако рентгеноспектрометрический метод достигает чувствительности $3-10 \text{ млн}^{-1}$ при времени определения 10^{-1} мин в зависимости от состава проб. Сплавление с бурой или тетраборатом лития ослабляет влияние состава проб, но в то же время снижает и точность определения. Таким образом, результаты высокой точности можно получить путем обогащения сплава. Такая обработка значительно замедляет определение, но его можно ускорить, стандартизируя отдельные типы проб.

Люминесцентный метод довольно быстрый и точный, но для получения результатов высокой точности из анализируемых проб пород или почв необходимо удалить мешающие элементы. Обычно это переходные элементы четвертой группы. Железо, например, может быть удалено из хлоридного раствора экстракцией эфиром. Экстракция трибутилфосфатом с последующей бумажной хроматографией и люминесцентным окончанием весьма успешно применялась при определении урана на геохимических уровнях концентраций [2].

Определение урана в воде, если не считать трудностей, возникающих при определениях любого металла в количествах нескольких микрограмм, относительно несложно, поскольку элементы, обычно мешающие в значительных концентрациях, в этом случае отсутствуют или их содержания очень малы. Поэтому для анализа водных проб в практику вошло прямое применение люминесцентного метода. Метод успешно применялся Майером [14] на сухих остатках, полученных при выпаривании проб объемом 10 мл с использованием аликвоты водной пробы в 1 мл (личное сообщение Смайлеса). Разработаны также химические колориметрические методы, но они затруднены помехами, вызываемыми органическими примесями (такими, как гумидные кислоты) и промышленными отходами, что вызывает образование эмульсий при экстракции растворителя и обесцвечивание окрашенных соединений. Нередко проводят предварительное концентрирование урана в виде быстро образующихся осадков с последующим

определением различными аналитическими методами.

Нейтронные активационные методы имеют преимущества благодаря своей высокой чувствительности и индифферентности к влиянию загрязнения реагентов. Однако эти методы, включающие разделение продуктов распада, таких, как ^{131}I и ^{140}Ba , медленны и требуют квалифицированного штата аналитиков. Сравнительно новый метод [1, 5] основан на измерении медленных нейтронов с периодом полураспада около 20 с, полученных посредством облучения ^{235}U тепловыми нейтронами. Усовершенствование метода [4] привело к уменьшению времени, затрачиваемого на анализ каждой пробы, до 2 мин; кроме того, путем автоматизации процесса исследовалась одновременно большая серия образцов. Метод специфический, лишь несколько мешает торий ($100 \text{ млн}^{-1} \text{ Th}$ дают тот же результат отсчета, что и $0,3 \text{ млн}^{-1} \text{ U}$). Кроме того, он чувствителен (около $0,03 \text{ мкг/л}$) и точен с относительной стандартной ошибкой 1% на уровне 15 мкг/л . Метод для большинства определений не зависит от состава проб и может поэтому применяться обычно без изменения схемы подготовки. Для проб пород, почв и донных осадков необходимы только сушка и взвешивание, а водные пробы следует поместить в соответствующие пластиковые контейнеры. Как и при других неразрушающих методах, при методе медленных нейтронов проба сохраняется после удаления наведенной активности и пригодна для других видов исследования.

По мнению автора, развитие метода медленных нейтронов для определения урана представляет собой значительный шаг вперед в применении геохимических методов при поисках урана.

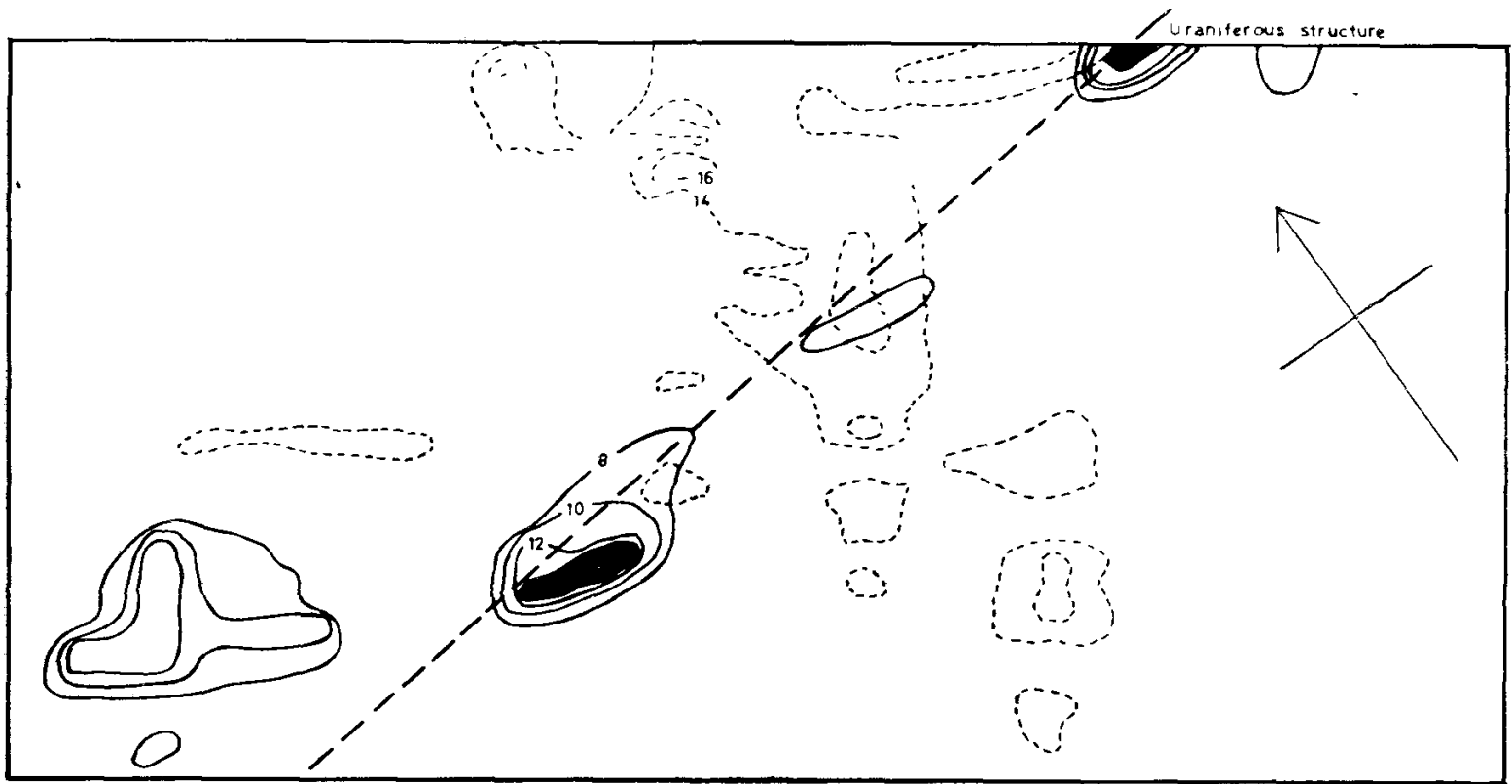
Применение при поисках урана. Если уран в процессе выветривания разъединен со своими гамма-активными продуктами распада, он не может быть обнаружен радиометрически, пока на новом месте его отложения не прошло время, достаточное для накопления продуктов распада. Следовательно, в процессе переноса уран может быть обнаружен только химическим путем, являющимся, таким образом, одним из двух перспективных способов обнаружения урановых месторождений *in situ* под покровом рыхлых отложений, сложенных, главным образом, делювием и аллювием, в которых остаточная гамма-активность в зоне выщелачивания месторождения в значительной степени замаскирована.

При изучении распределения урана в различных условиях применялась аппаратура для

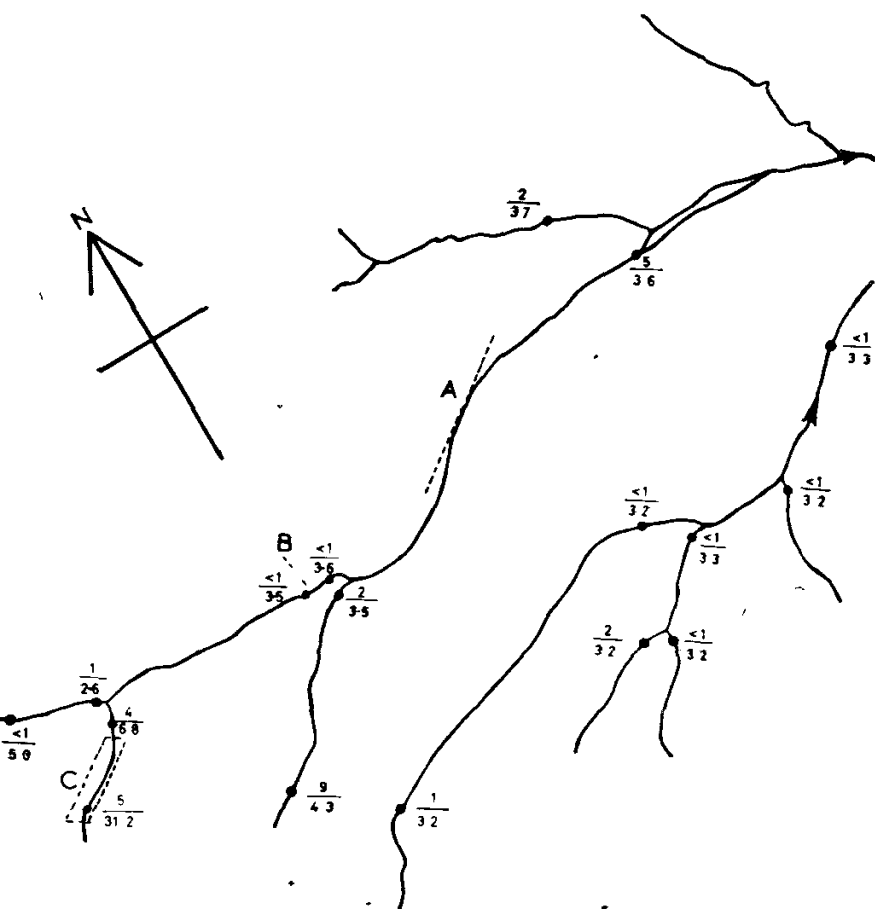
медленных нейтронов в Алдермастон AWRE. Кроме того, использовался обычный аналитический метод в помощь региональным исследованиям, проведенным в Великобритании. Ниже приводятся некоторые результаты этих исследований. Для анализа брались навески 1 г высушенных проб почв и донных осадков и 30 мг для проб воды. Для последних чувствительность составляла 1 мкг/л с точностью около 50% (без предварительного обогащения).

1. *Сравнение распределения урана в почвах, водах и донных осадках.* Для обоснования геохимического подхода к поискам урана было проведено исследование на площади развития девонских отложений, где были известны незначительные разобщенные концентрации урановых минералов среди контактово-метаморфических сланцев и алевролитов. Район представляет собой глубоко изрезанное, культивируемое нагорье с остаточной почвой, не затронутое плейстоценовым оледенением. На фиг. 1 показано взаимоотношение между распределением гамма-активности и содержанием урана в почве, определенным активационным анализом (метод медленных нейтронов) по пробам, отобраным по сетке 50×100 футов. Ураноносная линейная структура проявляется непосредственно к востоку от опробованной площади, а ее западное продолжение точно оконтуривается аномальными содержаниями урана в почвах. На той же площади были установлены слабо аномальные значения гамма-активности, но они ни в какой степени не связаны с ураноносными структурами, а скорее, по-видимому, определяются положением и перераспределением продуктов распада урана по широкой долине.

Распределение урана в водах в ветвящейся гидросети на этой же площади было определено в пробах активационным анализом (метод медленных нейтронов). Его связь с ураноносными структурами показана на фиг. 2. Постоянство аномальных значений на больших расстояниях вниз по течению от урановых проявлений показывает ценность использованного метода с чувствительностью 1 мкг/л для обнаружения и локализации даже таких мелких рудопроявлений. Существование ураноносной структуры в районе А до опробования воды не предполагалось, но радиометрические поиски впоследствии установили здесь гамма-аномалию в условиях влажности, что характерно для структур, эманлирующих радон. В этой обстановке аномалия может быть обнаружена только в том случае, когда рудопроявление урана непосредственно пересекается потоком. В районе В проявление урановой минерализации находится в стороне от русла потока, поэтому просачи-



ФИГ. 1. Сравнение радиометрических данных (пунктирные линии, изолинии 14 и 16 мкр/ч) и содержания урана в почвах (изолинии 8, 10, 12 и 14 млн⁻¹) среди девонских отложений на площади 300 × 600 м. Показано простираание ураноносной структуры.

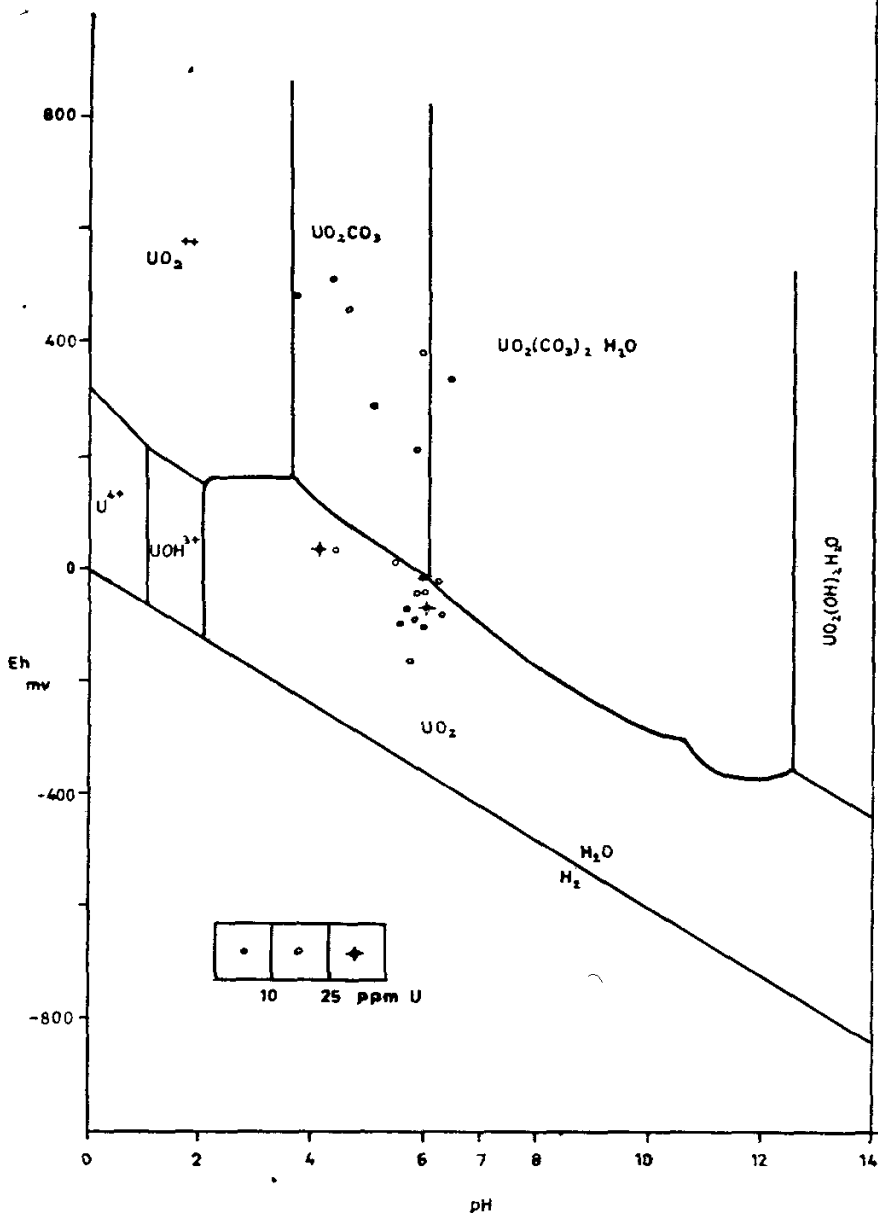


ФИГ. 2. Сравнение содержаний урана в воде (верхние цифры, мкг/л) и донных осадков (нижние цифры, млн⁻¹, фракция —80 меш). А, В и С — ураноносные структуры.

вание воды через руду и почву не приносит в ощутимых количествах уран в воду потока.

Сравнительная концентрация урана в донных осадках показана на фиг. 2, где видно, что фиксируемый поток рассеяния короче, чем водный и фактически локализуется непосредственно вблизи рудопроявлений. Это наблюдение подтверждается исследованиями на других площадях.

2. *Некоторые факторы, влияющие на рассеяние и отложение урана.* Давно известно [6, 8], какое влияние оказывает содержание бикарбонатного иона в воде на растворимость урана. Уран образует очень стойкий бикарбонатный комплекс, который довольно трудно осадить из раствора. Этим объясняется большая протяженность потоков рассеяния урана в водах, протекающих над карбонатными формациями, по сравнению с водами, протекающими в силикатной среде. Однако уран собирается торфами, но только тогда, когда бикарбонатные комплексы становятся нестабильными. В одном из районов Мидленда, Англия, где ряд источников стекает на площадь, сложенную торфами, вода очень насыщена бикарбонатом (200 мг/л CaCO₃) и в меньшей степени — ураном (2—30 мкг/л). На фиг. 3 представлен график торфяных проб, нанесенных на диаграмму водного равновесия части системы U — O₂ — H₂O —



ФИГ. 3. Данные по торфянику в Инглиш-Мидлендз, нанесенные на диаграмму равновесия раствора системы $U - O_2 - H_2O - CO_2$ при $25^\circ C$ и 1 атм с $\Sigma CO_2 = 10^{-3} M$ [11], общее для ионов 10^{-4} .

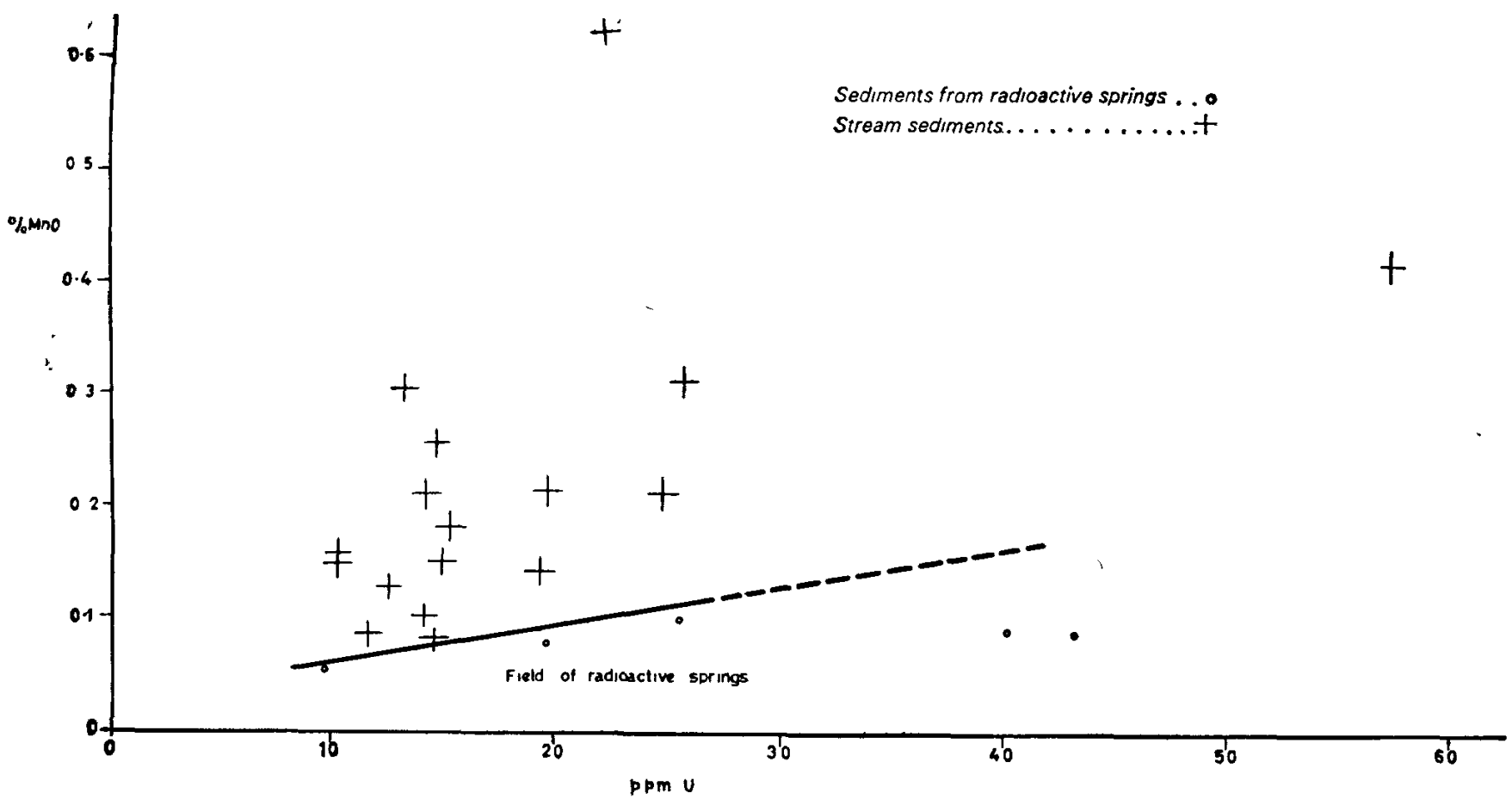
CO_2 при $25^\circ C$ и одной атмосфере с общей активностью CO_2 $10^{-3} M$. Как видно из диаграммы, высокие содержания урана в торфах зависят не только от количества урана в притекающей воде, но также и от восстановительного характера среды. Пробы, лежащие в поле устойчивости уранинита, обнаруживают очень высокое содержание урана; эти наблюдения подтверждают результат экспериментальной работы Титаевой [21]. Кое-где, особенно в сильно заболоченных областях, наблюдалось, что комбинация воды, богатой карбонатом, и торфяного грунта с низким рН (3,5) приводила к образованию торфяных урановых месторождений. Однако к таким аномальным концентрациям урана следует подходить с осторожностью, так как они могут быть связаны с локальным проявлением урана в подстилающей породе.

Другим фактором, имеющим большое значение при интерпретации результатов геохимических исследований в горных районах, является обильное осаждение гидроокислов марганца и железа. Эта проблема привлекла внимание Канея [3], Хорселла и др. [12], которые сообщили о высоких концентрациях мигрирующих металлов, соосажденных с гидроокислами в донных осадках. Обычно почвы горных районов кислые и с более восстановительной обстановкой, чем поверхностные воды. В этих условиях марганец и железо растворяются в грунтовых водах и осаждаются при переходе в менее кислые и обычно более богатые кислородом воды. Одно из наблюдаемых воздействий этого явления на распределение урана показано на фиг. 4. Здесь приводится анализ проб из сильно дождливого заторфленного района Дартмур в юго-западной Англии, сложенного гранитами. В районе протекают несколько ручьев, дренирующих радиоактивные источники, а также ручьи с нормальным дренажем. Но поскольку последние содержат больше марганца, они обнаруживают аномальные концентрации урана, создавая тем самым зону ложных аномалий. Очевидно, если условия неблагоприятны для осаждения гидроокислов, заметного обогащения донных осадков ураном не происходит. Поэтому анализы донных осадков имеют сомнительную ценность и значительно менее эффективны для нахождения разрозненных месторождений урана, чем анализы воды или почв. Кроме того, если водные потоки несут жесткую воду, то уран не соосаждается с гидроокислами.

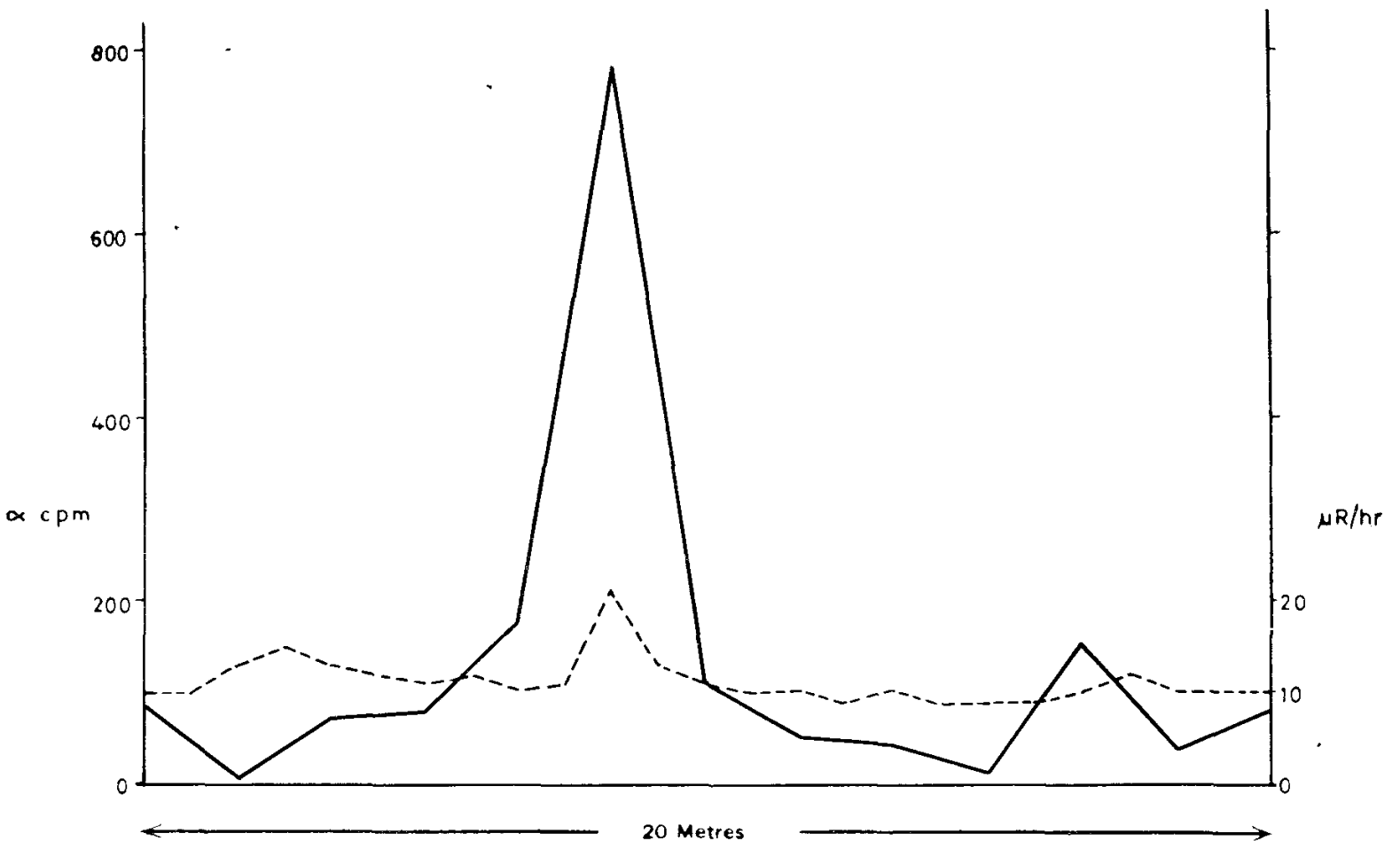
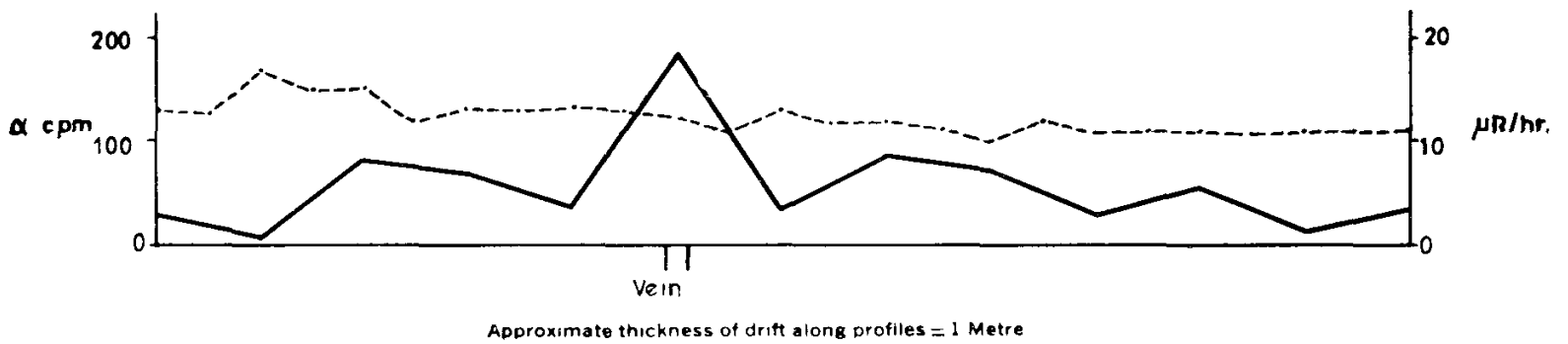
КОСВЕННЫЕ МЕТОДЫ

Эти методы основаны на изучении распределения элементов, представляющих собой или продукты распада урана (например, радон и ^{214}B), или его элементы-спутники в рудных месторождениях и в ореолах рассеяния таких месторождений.

Радон в почвенном воздухе. Измерения концентраций радона в почвах и других рыхлых поверхностных отложениях заранее рассматривались как потенциально перспективный метод обнаружения урановых месторождений, залегающих под нерадиоактивным покровом [16, 19]. Радон является специфическим индикатором урана. Как газ, он стремится мигрировать вверх сквозь сухие осадки и, имея короткий период полураспада, он, вероятно, содержится в высоких концентрациях вблизи материнского рудного тела урана, за исключением тех случаев, когда циркуляция вадозных вод увеличивает степень рассеяния. На фиг. 5



ФИГ. 4. Диаграмма связи урана и растворимой в кислоте окиси марганца во фракции —80 меш по пробам донных осадков с площади гранитов Дартмур в юго-западной Шотландии. Кружками показаны осадки из радиоактивных источников, крестиками — донные осадки, внизу — поле радиоактивных источников.

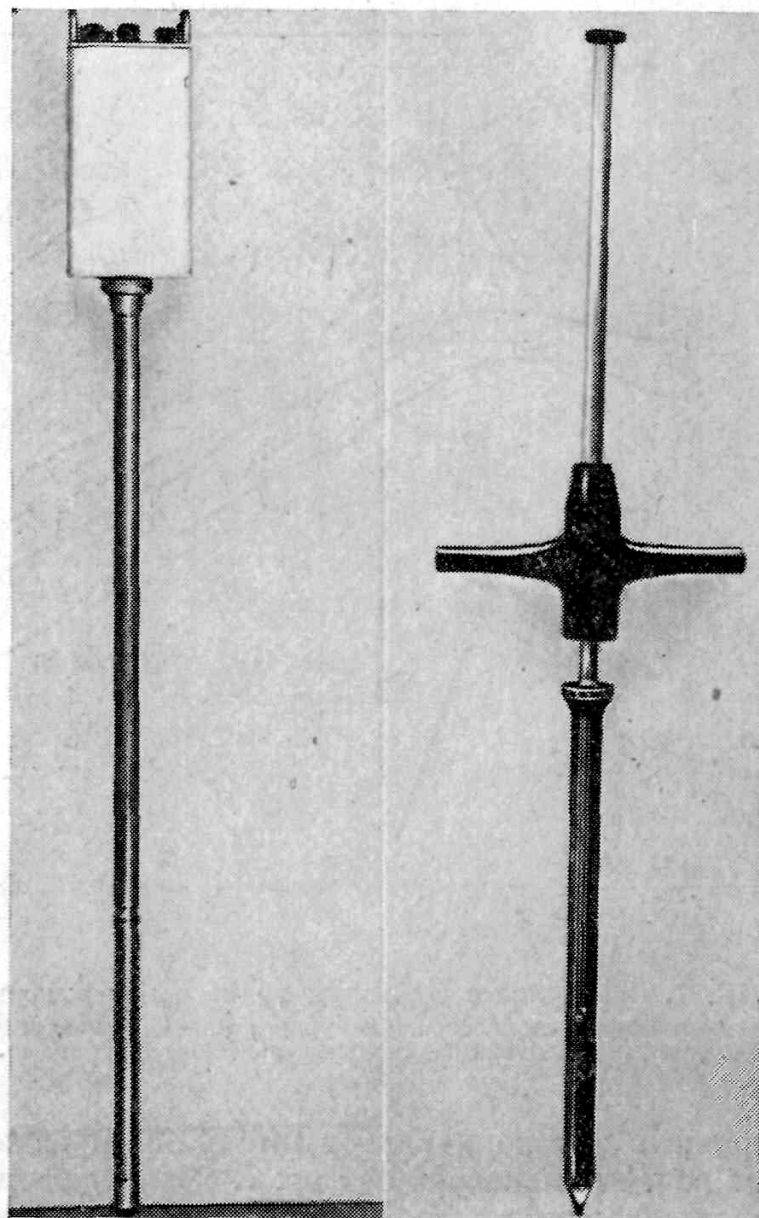


ФИГ. 5. Сравнение данных радиометрии (пунктирная линия) и содержаний радона в почве по профилям над ураноносной жилой в южной Шотландии в сухую погоду (вверху) и после сильного дождя (внизу). Приблизительная мощность ледниковых отложений по профилям около 1 м.

показано распределение радона в почвенном воздухе под маломощной уранинитсодержащей жилой, залегающей в контактово-метаморфизованных аргиллитовых породах в южной Шотландии и перекрытой в настоящее время ледниковыми отложениями. Хотя с изменением метеорологических условий концентрация радона изменяется в 10 раз, над жилой всегда устанавливаются высокие содержания радона. На поверхности рудопроявление не обнаруживается радиометрией, отсутствуют также и ореолы урана в почве или подпочвенном слое вблизи жилы, а следовательно, оно не может быть обнаружено прямыми методами.

Определение радона производилось до сих пор путем откачки воздуха из почвы, а измерения содержания радона на поверхности — различными методами на месте опробования или в лаборатории [13, 7]. Хотя такой подход и эффективен во многих случаях, однако этот метод недостаточно чувствителен и точен, а некоторые условия отбора проб спорны. Например, откачка воздуха из рыхлых поверхностных отложений почти наверняка нарушала нормальные условия равновесия и могла привести также к загрязнению атмосферным воздухом. Различие между коэффициентами диффузии пород, окружающих пробные бурки, может привести к ненадежной оценке содержаний радона в почвенном воздухе. Методы, основанные на естественной диффузии в отборные бурки, при которых извлекались только малые пробы почвенного воздуха [16] для измерения радона, дают возможность получить лишь небольшое количество альфа-отсчетов и, следовательно, низкую статистическую точность, а кроме того, требуют относительно большой затраты времени.

Предварительные полевые исследования показали, что статистически надежные измерения можно получить в бурках малого диаметра до глубины 60 см; в них опускался чувствительный альфа-детектор и измерялось суммарное альфа-излучение. При этом исключался этап откачки и не затрачивалось время, необходимое для достижения равновесия. Помимо высокой скорости метода и использования самой простейшей счетной аппаратуры, он оказался столь же точным в определении измерения концентраций радона в почве и в воздухе, как и методы, при которых необходима откачка воздуха из почвы. Дальнейшее развитие метода было направлено на увеличение длины детектора и создание более удобного счетного устройства. Один из первых приборов показан на фиг. 6. Полевые испытания показали, что метод эффективен для оконтуривания ореолов с аномальной концентрацией радона над коренными месторождениями урана

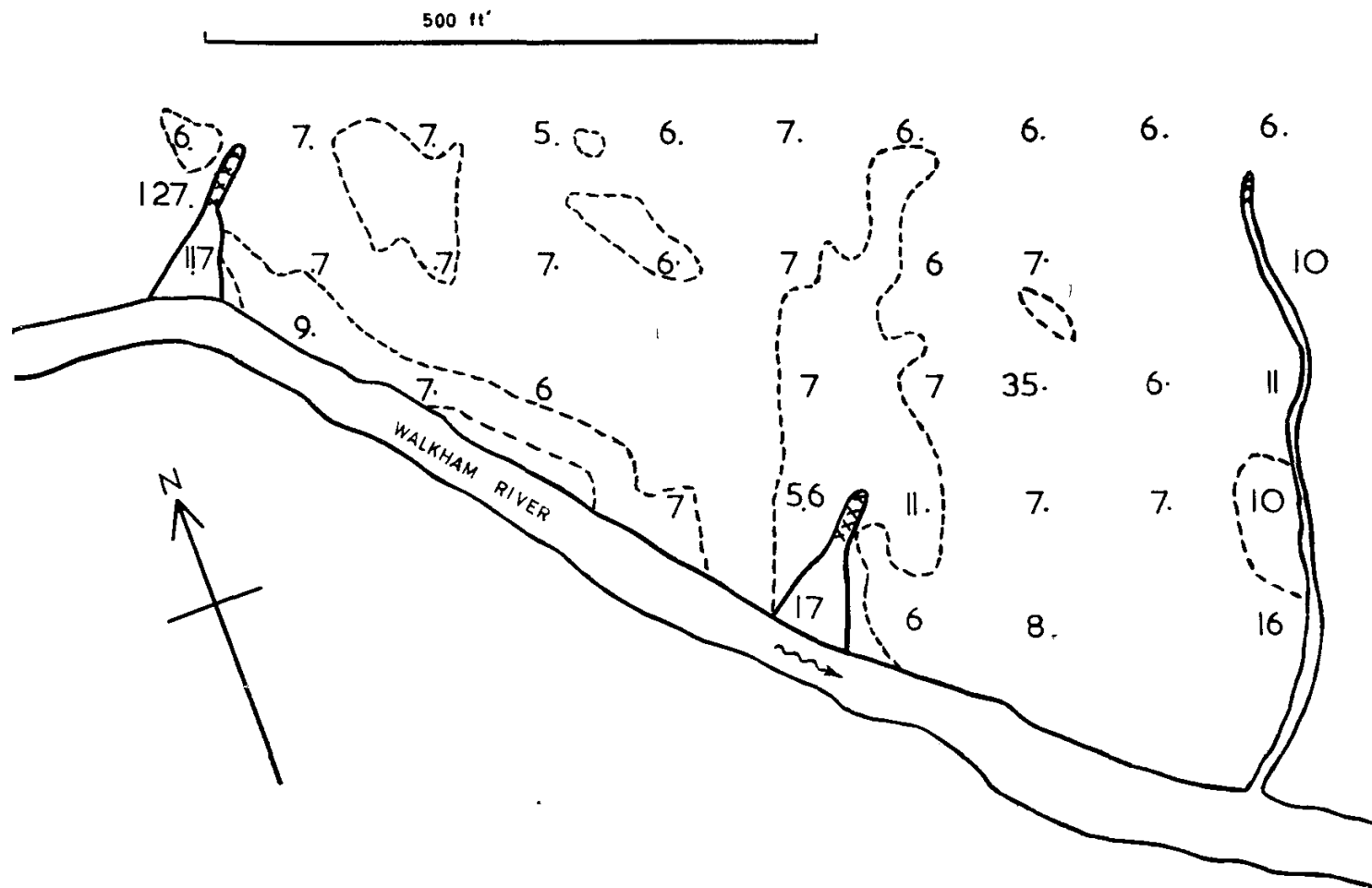


ФИГ. 6. Аппаратура для измерения радона (слева) и вращающийся прибор для опускания в бурку (справа). Длина зонда 1,5 м.

и что положение этих ореолов заметно отличается от установленных радиометрией (там, где она производилась). Значительно труднее применять этот метод определения радона в насыщенной водой торфянистой почве, в которой бурки сужаются, что приводит к загрязнению детектора посторонним материалом. Работы, направленные на решение этой проблемы, развиваются удовлетворительно.

Метод определения радона *in situ*, экономичный по затрате времени и труда научного персонала, очень удобен для небольших глубин, но в атмосферных условиях приводит к колебаниям потока радона. Установлено, что разрезы почв зависят от изменений, связанных с поверхностной влажностью почв и атмосферным давлением. Эти вопросы будут освещены более детально в другой работе.

Когда радон растворен в грунтовых водах, наблюдаемое его распределение в почве может



ФИГ. 7. Сравнение содержания урана в поверхностном торфе и радона в почвенном воздухе. Цифрами обозначено содержание урана, млн⁻¹; пунктирными линиями ограничены участки, где альфа-излучение больше 100 мкюри; радиоактивные источники показаны крестиками.

отражать только характер циркуляции вадозных вод. Это показано на фиг. 7. Распределение радона связано с радиоактивными источниками и зонами, которые определяются предполагаемыми направлениями подземных притоков. Концентрация урана в торфянистой почве также повышается вблизи источников, и максимальные значения устанавливаются при приближении к зоне фильтрации грунтовых вод около реки.

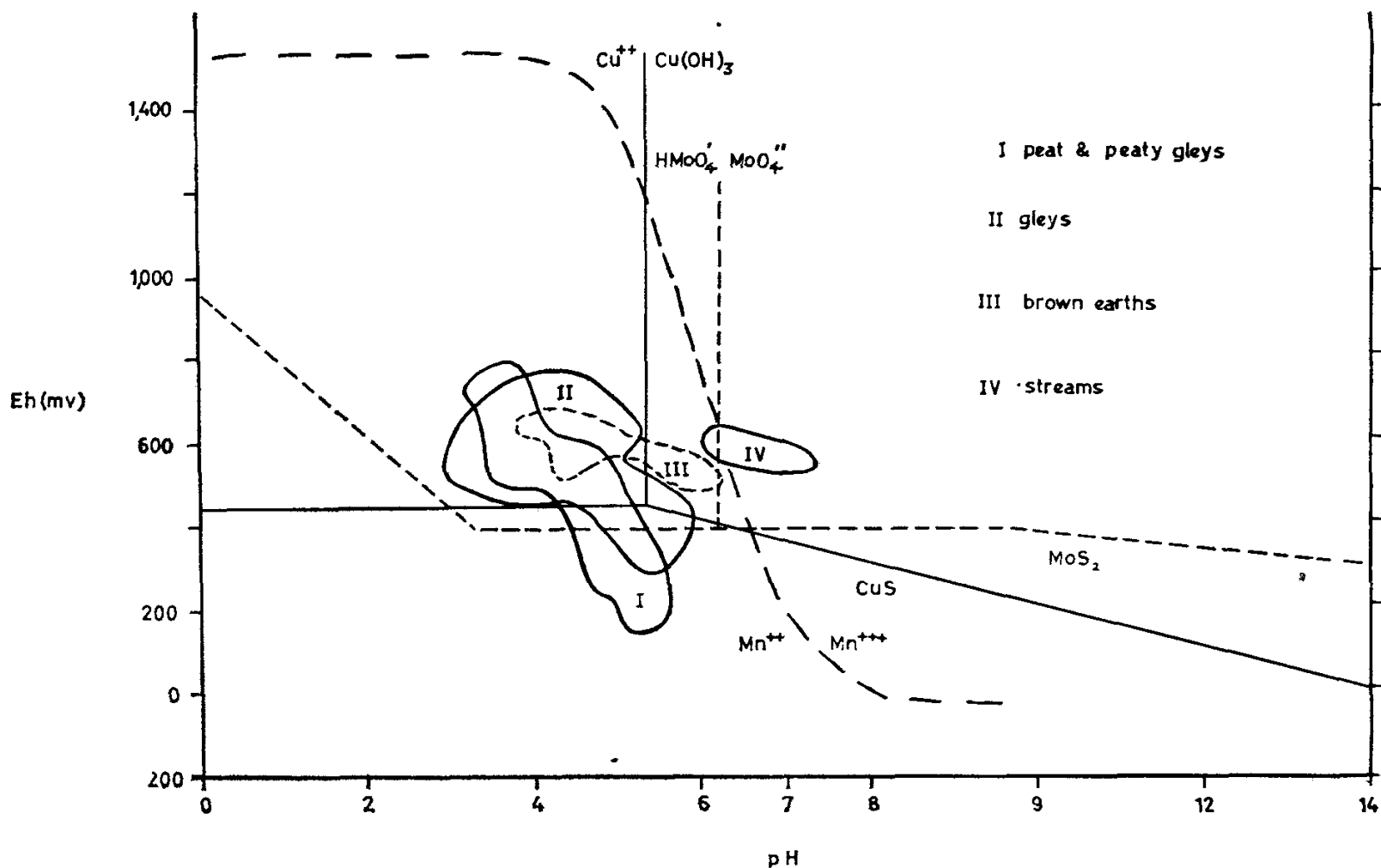
Хотя и существуют затруднения в определении концентрации радона, вызванные изменениями условий в атмосфере и почве, они могут быть сведены к минимуму, если определения производить с интервалом через 1 ч в стандартной бурке и использовать значения, полученные в результате эталонирования.

Элементы-индикаторы. Использование вторичных ореолов индикаторов для поисков урана, так же как и других металлов, оправдано только в том случае, когда химически их значительно легче определить, чем уран, или когда их подвижность резко отличается от подвижности урана при существующих условиях выветривания. Если вышеописанные методы определения урана вполне доступны, то установить содержание других металлов не столь просто,

за исключением случаев, когда они присутствуют в относительно высоких концентрациях. В полевых лабораториях экономичны по затратам времени и довольно точны колориметрическое и абсорбционное определения некоторых металлов, обычно ассоциирующих с ураном.

Благодаря работам Гаррелса [6], Сато [17] и Хансулда [10] мы имеем более или менее полное представление о влиянии концентрации, кислотности и окислительно-восстановительного потенциала на наиболее распространенные сульфидные минералы, что может быть использовано для определения роли элементов-индикаторов при поисках месторождений с известными ассоциациями элементов.

Уран в наиболее типичных жильных месторождениях Англии ассоциирует с железом, медью, висмутом и реже с молибденом. Встречаются также галенит и сфалерит, а обычными жильными минералами являются карбонаты. Некоторые проблемы, связанные с использованием элементов-индикаторов для поисков таких ассоциаций, изучались в северной Шотландии, где слабо дифференцированные почвы лежат под сплошным покровом торфа. Почвы эти остаточные или развитые по ледниковым отложениям. Поля Eh/pH, соответствующие почвам



ФИГ. 8. Поля Eh/pH для почв и водных потоков в северной Шотландии.

Нанесены приблизительные поля устойчивости ковеллина и молибденита и их продуктов выветривания, а также окислительно-восстановительный потенциал реакции $Mn^{2+} \rightarrow Mn^{3+}$ (по [17] и [10]). I — торф и торфянистый глей; II — глей; III — каштановые почвы; IV — источники.

и водам ручьев района, показаны на фиг. 8, на которой приведены, кроме того, поля устойчивости CuS и MoS_2 и продуктов их выветривания.

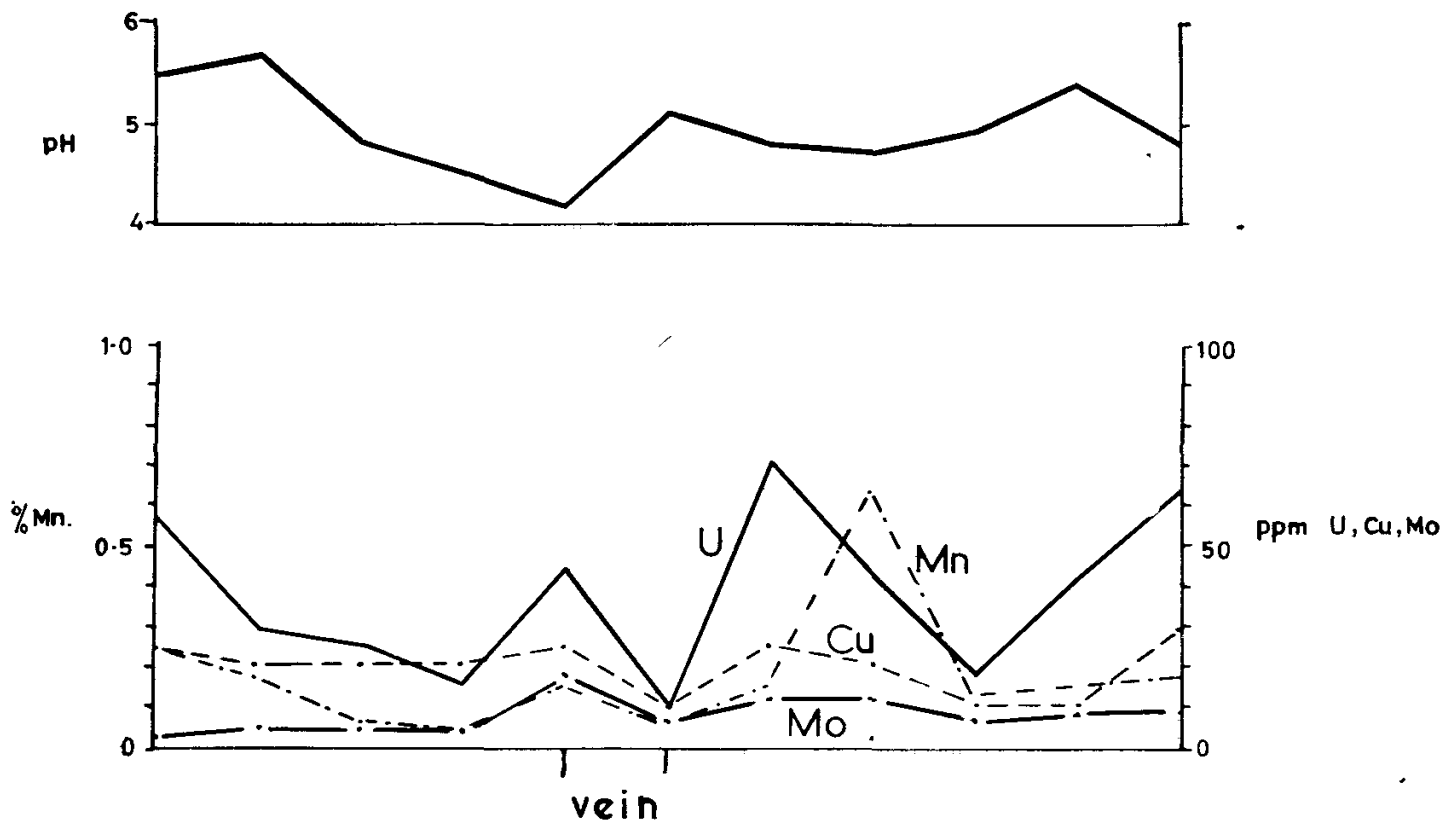
Каштановые почвы образовались локально над теми рудными жилами, где уровень грунтовых вод низкий и где в жилах присутствует достаточное количество кальцита. Кое-где жилы перекрыты торфом, торфяным глеем и частично оглееными каштановыми почвами. Величина pH каштановых почв обычно выше, чем у других почв, и это отражается в известной степени на концентрации элементов, относительно неподвижных в условиях высокого pH. В каштановых почвах может концентрироваться медь, поскольку в этих условиях образуется относительно нерастворимая $Cu(OH)_2$, в то время как на соседних участках медь остается довольно подвижной. Марганец ведет себя сходным образом — приблизительный окислительно-восстановительный потенциал реакции ($Mn^{2+} \rightleftharpoons Mn^{3+} + e$) проходит близко к полю устойчивости каштановых почв и ион марганца остается относительно неподвижным. С другой стороны видно, что почвы района или не вызывают окисления молибденита, или образуют

относительно нерастворимые соединения молибдат-иона. В любом случае молибден не мигрирует и его появление в почве объясняется механическими причинами. Сходное поведение обнаруживает цинк. На фиг. 9 и 10 представлены результаты анализов проб по профилям над одной и той же жилой, но на участках, сложенных различными почвами.

В условиях, когда прямое определение урана в торфяных продуктах не выявляет аномалий или аномалия смещена в сторону от материнской жилы, а также когда метод определения радона в почве не применим из-за обводнения бурок, методом определения элементов-индикаторов в пробах торфа может быть выявлена перспективная структура. Было показано, что цинк и молибден можно использовать в этом направлении особенно успешно.

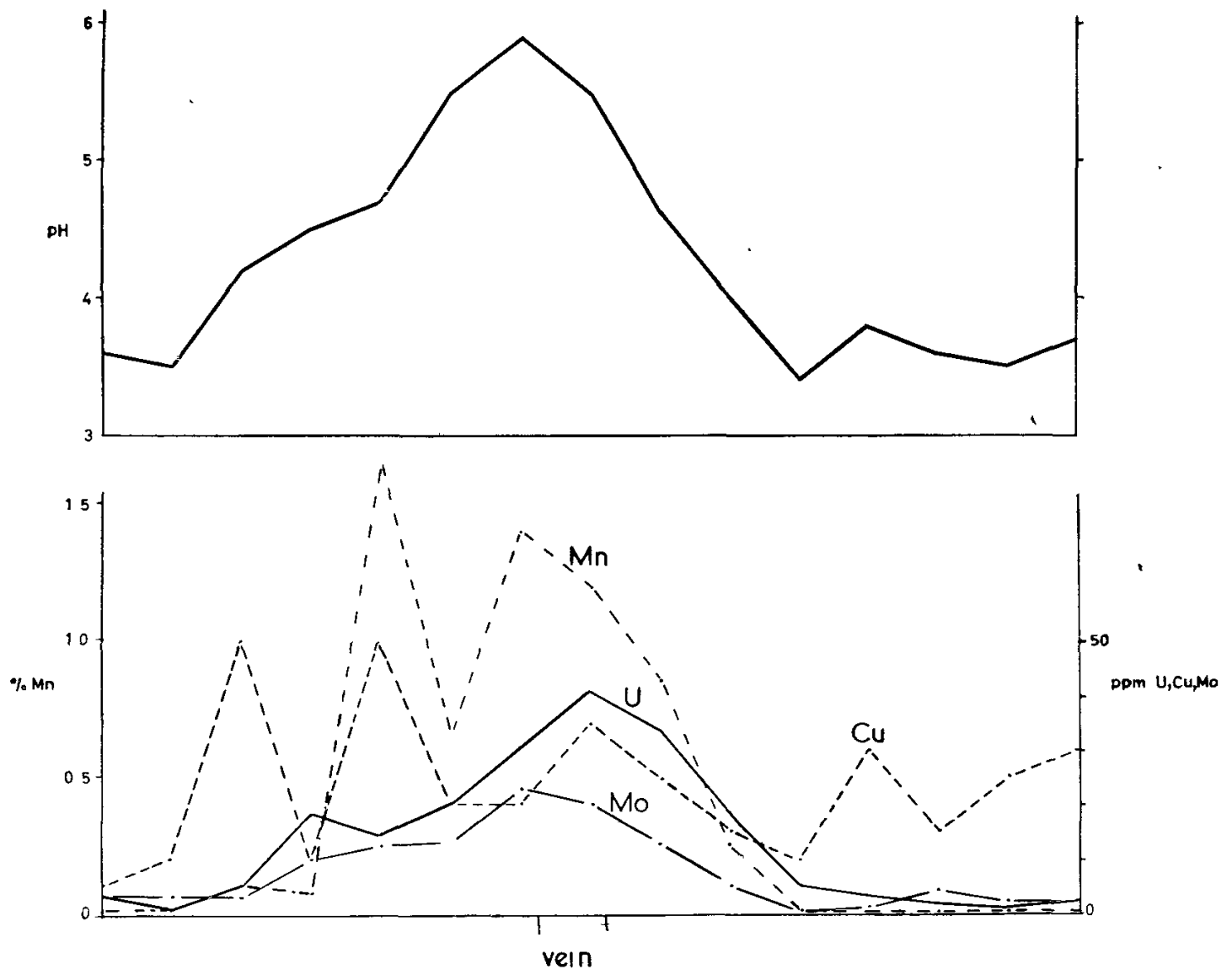
ВЫВОДЫ

Выявление дополнительных запасов урана во все увеличивающейся степени будет зависеть от открытия рудных тел, не обнаруживаемых радиометрией на поверхности. Это требует применения как геохимических, так и



ФИГ. 9. Изменение рН и содержаний U, Cu, Mn, Mo по профилю, пересекающему урансодержащую жилу в северной Шотландии.

Пробы взяты через интервал 3 м из глеевых и торфяно-глеевых почв.



ФИГ. 10. Изменение рН и содержаний U, Cu, Mn, Mo по профилю через жилу, показанную на фиг.9.

Здесь развиты каштановые почвы с высокими значениями рН.

других методов поисков в гораздо большем масштабе, чем они использовались до сих пор. Из существующих в настоящее время методов наиболее перспективным считается определение урана в поверхностных водах. Он одинаково ценен как при рекогносцировочных, так и детальных работах [9]. Анализ донных осадков, как установлено, имеет ограниченную применимость из-за незначительного размера ореола урана, а также проблем, связанных с захватом урана гелями окислов и гидрокислов марганца и железа. При известных условиях эти свойства могут иметь важное значение.

Высококчувствительный и точный анализ урана методом нейтронной активации и измерением медленных нейтронов резко повышает значение опробования почв, особенно в районах развития остаточных почв. Как было установлено, результаты этих анализов больше соответствуют геологическим данным, чем детальная радиометрия. Однако движение грунтовых вод может привести к перераспределению урана, в связи с чем могут образоваться удаленные от рудных тел аномалии урана.

Применение аппаратуры для определения радона в почвах с учетом его поведения на малых глубинах позволяет преодолеть многие препятствия (например, крутые склоны или слабо выщелоченный покров), мешающие почвенному опробованию, но и здесь радон может быть перераспределен грунтовыми водами.

Элементы-индикаторы имеют ограниченное значение при высококачественном определении основного элемента. Установлено, что молибден и цинк отчетливо фиксируют ураноносные структуры в нагорных районах с кислой средой, где в результате циркуляции вадозных вод уран и радий вынесены и переотложены.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Amiel S.*, Analytical Application of Delayed Neutron Emission in Fissionable Elements, *Analytical Chemistry*, 34, 1683—1692, 1962.
2. *Berthollet P.*, Méthodes d'analyse utilisées par la Section de Géochimie, Note C.E.A., № 250, 1968.
3. *Canney F. C.*, Hydrous Manganese-Iron Oxide Scavenging, its effect on stream sediment surveys, *Proceedings, Symposium on Geochemical Prospecting*, Geol. Surv. Canada, Paper, 66—54, 267, 1966.
4. *Coleman R. F.*, *Pierce T. B.*, Activation Analysis, A Review, *Analyst*, 92, № 1090, 1—19, 1967.
5. *Gale N. H.*, Development of delayed neutron technique as rapid and precise method for determination of uranium and thorium at trace levels in rocks and minerals, with application to isotope geochronology, in *Radioactive Dating and Methods of Low-Level Counting*, I.A.E.A., Vienna, 431—452, 1967.
6. *Garrels R. M.*, *Mineral Equilibria at Low Temperature and Pressure*, Harper, New York, 1960.
7. *Gosh P. C.*, *Bhalla N. S.*, A Closed Circuit Technique for Radon Measurement in Water and Soil, with Some of its Applications, *All India Symp., Radioactive Metrol. Radionucl. Proc.*, Bombay, 226—239, 1966.
8. *Grimbert A.*, Application des techniques Géochimiques de Prospection à la Recherche et à l'Etude des Gîtes Uranifères en France Métropolitaine, C.E.A., № 188, 1957.
9. *Grimbert A.*, *Loriod R.*, La Prospection géochimique détaillée de l'uranium, *Geol. Surv. Canada, Paper* 66—54, 167—171, 1967.
10. *Hansuld J. A.*, Eh and pH in Geochemical Prospecting, *Geol. Surv. Canada, Paper* 66—54, 172—187, 1967.
11. *Hostetler P. B.*, *Garrels R. M.*, Transportation and Precipitation of Uranium and Vanadium at Low Temperatures, with Special Reference to Sandstone-Type Uranium Deposits, *Econ. Geol.*, 57, 137—167, 1962.
12. *Horsnail R. F.*, *Nichol I.*, *Webb J. S.*, Influence of Variations in Secondary Environment on the Metal Content of Drainage, Sediments, *Inter. Geochem. Expl. Symp., Quart. Colorado School Mines*, 64, № 1, 307—322, 1969.
13. *Kraner H. W.*, *Schroeder G. L.*, *Evans R. D.*, Measurements of the Effects of Atmospheric Variables on Radon-222 Flux and Soil-Gas Concentrations, *The Natural Radiation Environment*, Univ. Chicago Press, 191—217, 1964.
14. *Meyer W. T.*, Uranium in Lake Water from the Kaipokok Region, Labrador, in *Inter. Geochem. Expl. Symp., Quart. Colorado School Mines*, 64, № 1, 377—394, 1969.
15. *Ostle D.*, Geochemical Prospecting for Uranium, *Min. Mag.*, 91, 201—208, 1954.
16. *Peacock J. D.*, *Williamson R.*, Radon Determination as a Prospecting Technique, *Trans. Inst. Min. & Metall.*, 71, 75—85, 1961.
17. *Sato M.*, Oxidation of Sulphide Ore Bodies; I — Geochemical Environments in Terms of Eh and pH, *Econ. Geol.*, 55, 928—961; II — Oxidation of Sulphide Minerals at 25° C, *Econ. Geol.*, 55, 1202—1231, 1960.
18. *Smith, Chandler*, A Field Method for the Determination of Uranium in Natural Waters, *Proc. 2nd U.N. Intern. Conf. on Peaceful Uses of Atomic Energy*, Geneva, 2, 148—152, 1958.
19. *Tanner A. B.*, Radon Migration in the Ground. A Review, *The Natural Radiation Environment* Univ. Chicago Press, 161—190, 1964.
20. *Thompson C. E.*, *Lakin H. W.*, A Field Chromatographic Method for Determination of Uranium in Soils and Rocks, *U.S. Geol. Surv. Bull.*, 1036-L, 209—220, 1957.
21. *Titayeva N. A.*, Association of Radium and Uranium with Peat, *Geokhimiya*, 12, 1493—1499, 1967.
22. *Ward F. N.*, *Marranzino A. P.*, The Field Determination of Uranium in Natural Waters, *U.S. Geol. Surv. Bull.*, 1036-J, 181—192, 1957.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТАЛЛОИДОВ (МЫШЬЯК, ФОСФОР, ФТОР) КАК ПОИСКОВЫХ ПРИЗНАКОВ СКАРНОВО-ВОЛЬФРАМОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ В ПИРЕНЕЯХ

Ф. Кашо-Эррейя,
Д. П. Пруэ

Служба геологических исследований и горного дела (В R.G.M.), Франция

ВВЕДЕНИЕ

Вольфрамовые месторождения скарнового типа во французских Пиренеях тесно связаны с герцинскими гранитами, внедрившимися в палеозойские породы ордовика и обнажающимися в «осевой части» этой горной цепи.

Некоторые месторождения были открыты и изучены В.Р.Г.М. еще в 1956 г. [4], но большинство из них представляли собой только рудопроявления. В настоящее время до стадии промышленной эксплуатации доведено только месторождение Сало (фиг. 1) [7]. Разведка и эксплуатация этого месторождения началась в 1970 г. Месторождение открыл Пасаки в 1960 г. Он рекомендовал этот район как перспективный в связи с наличием скарнов, связанных с гранитными интрузиями, и открытием в скарнах шеелита ультрафиолетовым методом.

Месторождение Сало приурочено к контакту небольшой интрузии Пик-де-ла-Фурк площадью 1 кв. км, являющейся апикальной частью батолита. Прорванные интрузией породы принадлежат к ордовика и представлены главным образом известняками, окруженными с юга слюдистыми сланцами, а с севера — карбонатными и пиритизированными сланцами силурийского возраста (фиг. 1). Известковые сланцы превращены в мраморы, гранатовые сланцы и роговики (начальная стадия контактового метаморфизма). В течение поздней стадии гидротермальные процессы привели к образованию массивных сульфидных линз пирротина в ассоциации с шеелитом и другими сульфидами, в том числе с небольшим количеством халькопирита, галенита и сфалерита [1].

Открытие этого месторождения, как указывалось выше, явилось результатом обычных поисковых работ. Тем не менее оно вызвало интерес к поискам месторождений подобного типа в этом районе, связанных со скрытыми интрузиями.

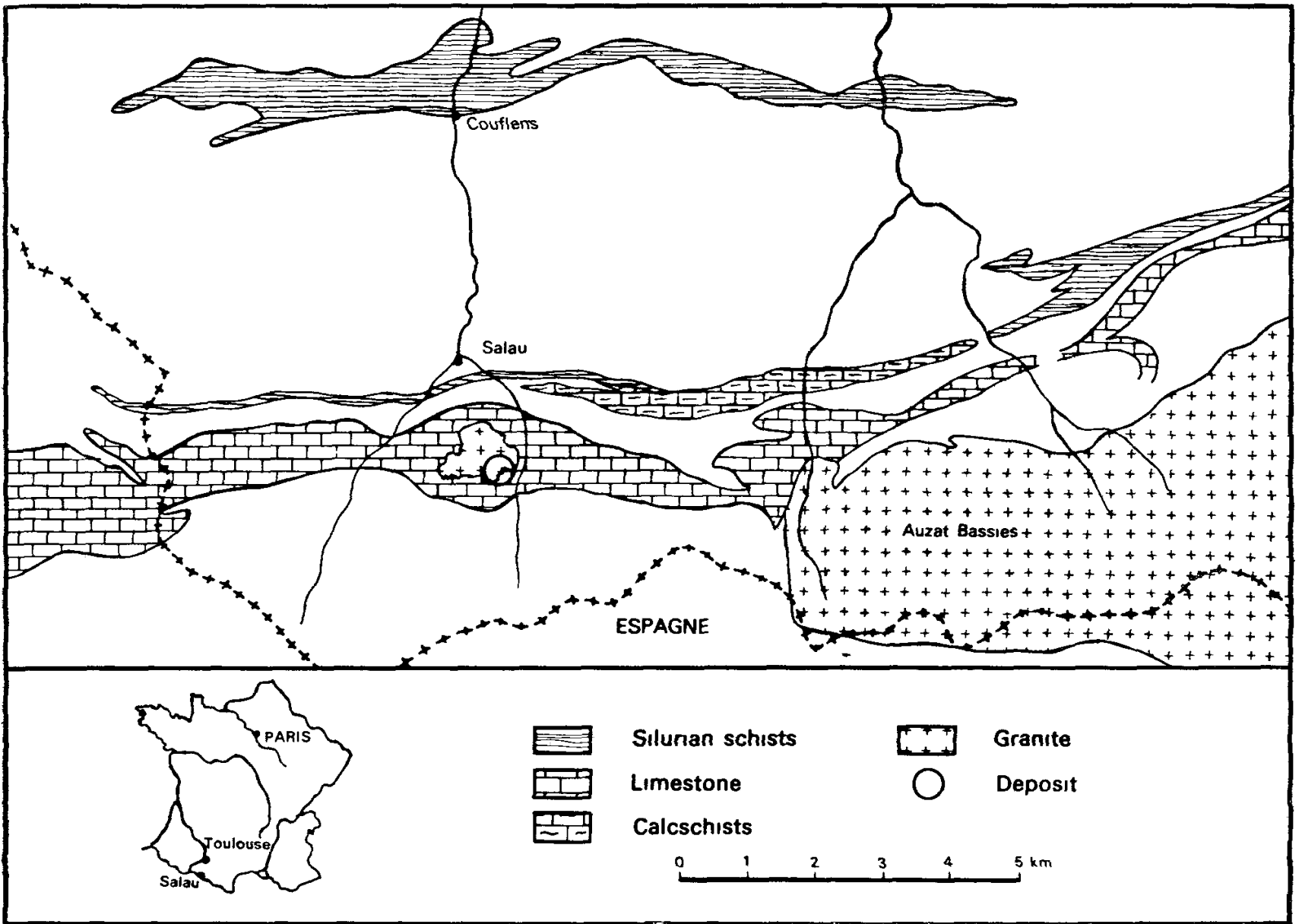
Для достижения этой цели в трудных условиях на месторождении Сало в порядке эксперимента применены некоторые геофизические методы для разработки комплекса поисковых методов [2]. Применение аэрогеофизических

методов (в Пиринеях, например) было затруднено из-за сильно расчлененного рельефа, а также присутствия силурийских графитовых сланцев. Хорошие результаты дали наземные геофизические работы по измерению сопротивления пирротиновых линз. Однако на месторождении не было обнаружено магнитных аномалий, так как пирротин здесь немагнитен.

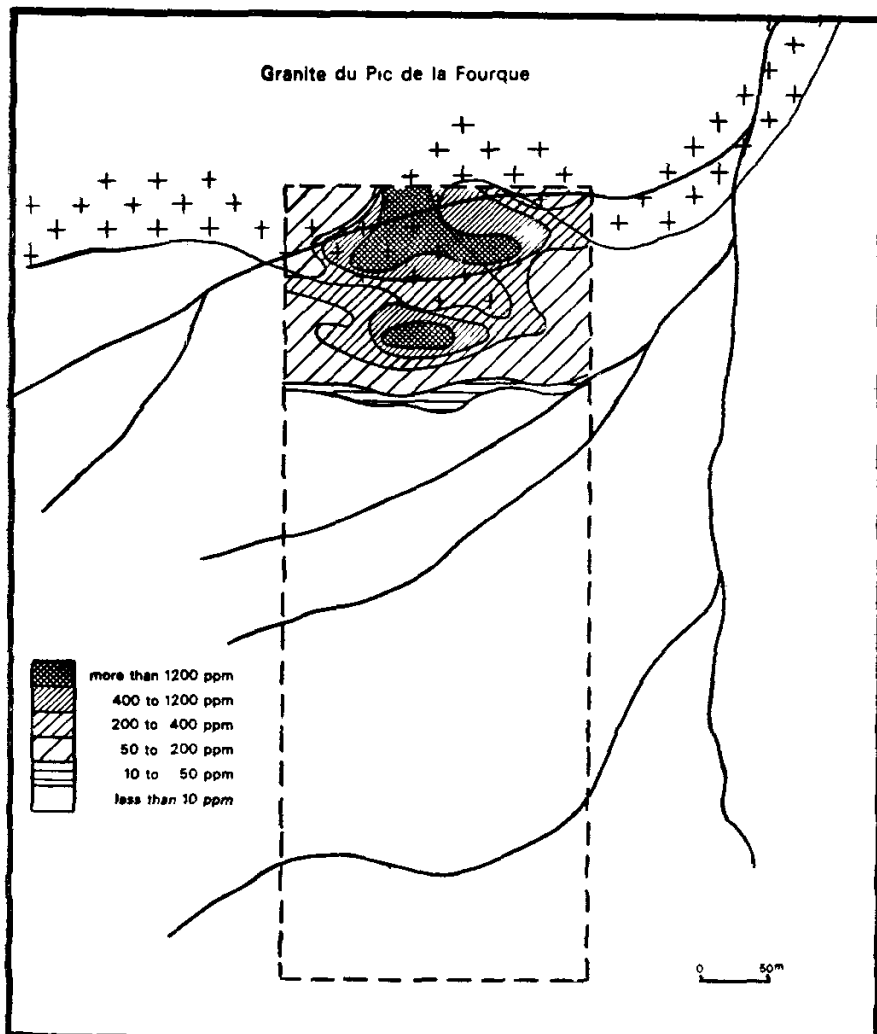
Были предприняты геохимические исследования с отбором почвенных проб вокруг месторождения и над ним, а также из донных осадков в тальвегах рек по направлению вниз от месторождения. Целью этих исследований было установление геохимических аномалий, отражающих классическую зональность металлических элементов вокруг гранитных массивов. Некоторые металлоиды, обнаруженные попутно в лабораториях В.Р.Г.М., явились основанием для составления проекта поисковых работ. Ниже приводятся результаты этих исследований.

МЕТОДЫ ОПРОБОВАНИЯ И АНАЛИЗОВ

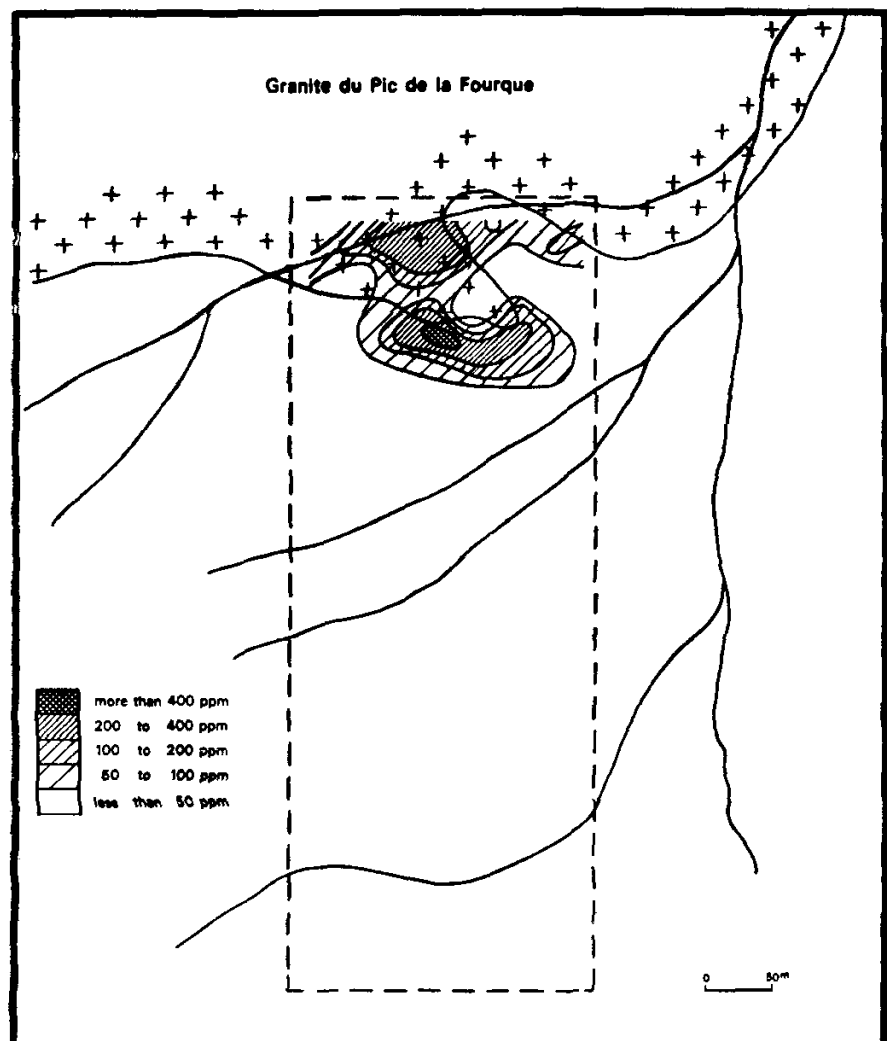
За время полевых работ летом 1966 и 1967 гг. было отобрано 860 проб: 250 почвенных по сетке 20×50 м, а 600 из русел рек с интервалом 250 м (одна проба бралась из уплотненных почв, перекрывающих отложения, а две — из русла реки с обоих бортов долины). Почвенные пробы отбирались с глубины около 20 см из горизонта В. Пробы дробились до фракции —120 меш и анализировались в лаборатории В.Р.Г.М. в Орлеане. Свинец и цинк определялись горячей экстракцией раствором HNO_3 — HCl и последующим колориметрическим определением с дитизоном, медь — экстракцией KHSO_4 и последующим колориметрическим определением с купроином, вольфрам и молибден — экстракцией KOH и определением с помощью дитиола, мышьяк — капельным методом с восстановленным водородом и хлоридом ртути, фтор — отгонкой в присутствии вольфрамового ангидрида при 900°C с применением циркон-ализаринового реагента, фосфор — разложением с помощью KHSO_4 и определением с фосфорно-ванадиево-молибденовым комплексом [3].



ФИГ. 1. Геологическая карта месторождения Сало.



ФИГ. 2. Геохимические результаты опробования почв на вольфрам.



ФИГ. 3. Геохимические результаты опробования почв на медь.

Результаты обработаны с помощью классических методов интерпретации, включающих построение гистограмм для определения регионального фона и оценки порога после изучения геометрического характера аномалий.

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДЛЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Результаты для *вольфрама* в почвенных пробах показаны на фиг. 2. Они обнаруживают интенсивные аномалии, тесно связанные со следами минерализованных скарнов, как установлено по кривым сопротивлений 1000—100 ом/м. Фоновые значения для вольфрама ниже 5 млн⁻¹. Месторождение четко определяется содержаниями в 100 раз превышающими фоновые, т. е. 500 млн⁻¹. На юге ряд изолиний оконтуривает близкие к фоновым содержаниям участки без всякого расширения, которое должно быть связано с первичным ореолом. На востоке вторичный ореол, наоборот, расширяется вниз по рельефу.

Результаты для *меди*, *цинка* и *свинца* показаны на фиг. 3, 4 и 5. Эти элементы также образуют аномалии, фиксирующие вольфрамовую минерализацию с содержанием элементов 5—10 фоновых величин. Размеры их не превышают аномалии вольфрама, за исключением цинка, который образует широкий ореол в нижней части долины.

Для *молибдена* не обнаружено аномальных содержаний. Фон для этого металла около 2 млн⁻¹.

В результате опробования были обнаружены аномальные содержания, обусловленные рассеянием элементов по руслам рек вниз от месторождения. Например, на расстоянии 500 м от рудного тела были отмечены содержания вольфрама 500 млн⁻¹, а на расстоянии 1000 м вниз по течению — 20 млн⁻¹. Другие металлы — медь, свинец и особенно цинк — также обнаруживают вторичные ореолы рассеяния вдоль русел рек. В случае цинка распределение осложняется наложением других вторичных ореолов рассеяния цинка, связанных со стратиформным рудопроявлением Соб в восточной части района. Из анализа результатов следует, что вольфрам наиболее интересен для поисковых целей как по контрастности, так и по распространению вторичных ореолов его рассеяния.

Подобные выводы можно было бы предсказать: вольфрам образует четко выраженные аномалии, важные при использовании геохимического метода, другие металлы не образуют широких аномалий и зональности, которую

можно было бы ожидать. Все они, видимо, тесно связаны с выходом рудного тела и его вторичных ореолов рассеяния. Признаки первичного ореола, который можно было бы использовать для поисков скрытых интрузий, отсутствуют.

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДЛЯ МЕТАЛЛОИДОВ

Геохимические результаты для *мышьяка* показаны на фиг. 6. Они показывают четко аномальное содержание — более 100 млн⁻¹ As при фоне 10—20 млн⁻¹. Аномалия простирается на 260 м (для вольфрама на 140 м) и более удалена от гранитов.

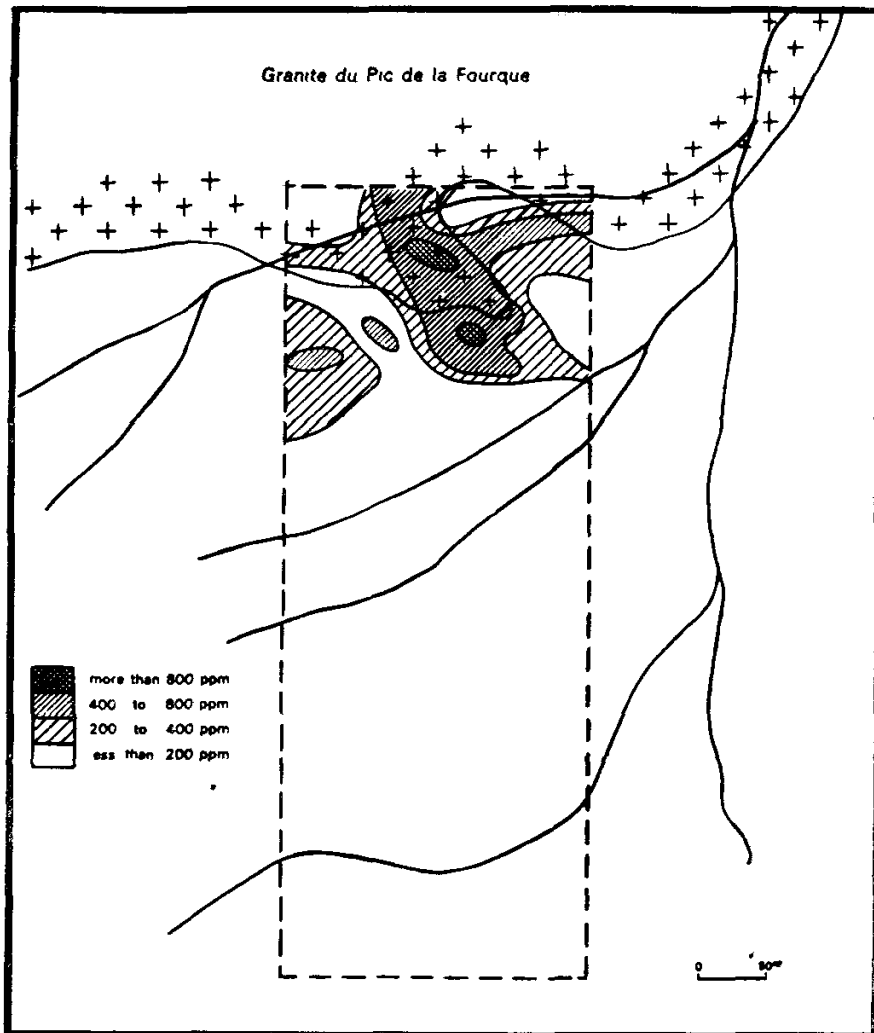
Результаты для *фосфора* показаны на фиг. 7. Аномалия состоит из двух частей: в северной части она охватывает гранитный массив и его контакты, а в южной части аномалия несколько смещена от вольфрамовой минерализации. Контрастность аномалии невелика — 600 млн⁻¹ при фоне 400 млн⁻¹, однако геометрия этой зоны с повышенным содержанием фосфора позволила определить ее как аномалию, несмотря на слабое статистическое обоснование. Правило — фон плюс два стандартных отклонения — не позволяет ее выделить.

Результаты для *фтора* показаны на фиг. 8. Они почти аналогичны результатам для фосфора с точки зрения статистического обоснования. Во всяком случае, аномалия существует и распространяется на 400 м, не пересекаясь с вольфрамовой аномалией и имеет незначительную контрастность (1000 млн⁻¹) при фоне 500 млн⁻¹.

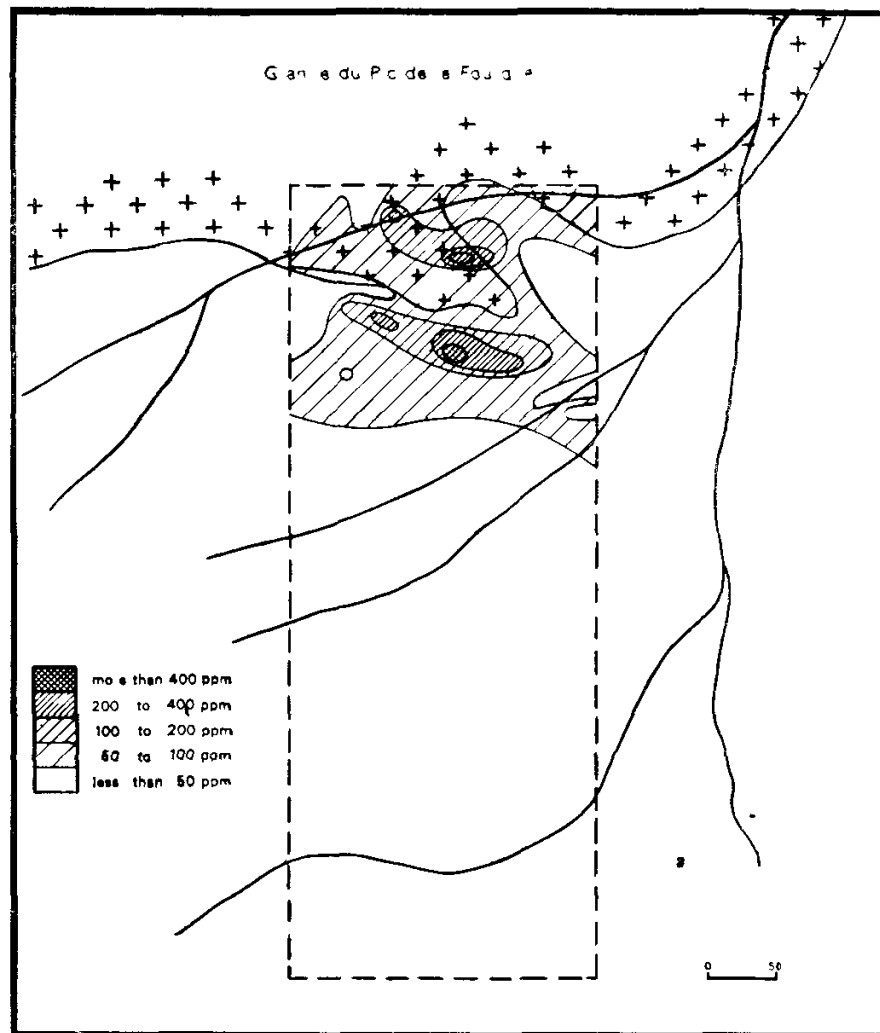
Результаты регионального опробования русел здесь не показаны. Но эти результаты также обнаруживают существенные аномалии, расположенные вокруг гранитной интрузии. Содержания увеличиваются в направлении ряда As — F — P. Аномалии этих элементов не только расширяют площадь, но также указывают местоположение гранитной интрузии благодаря зональности.

ДРУГИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

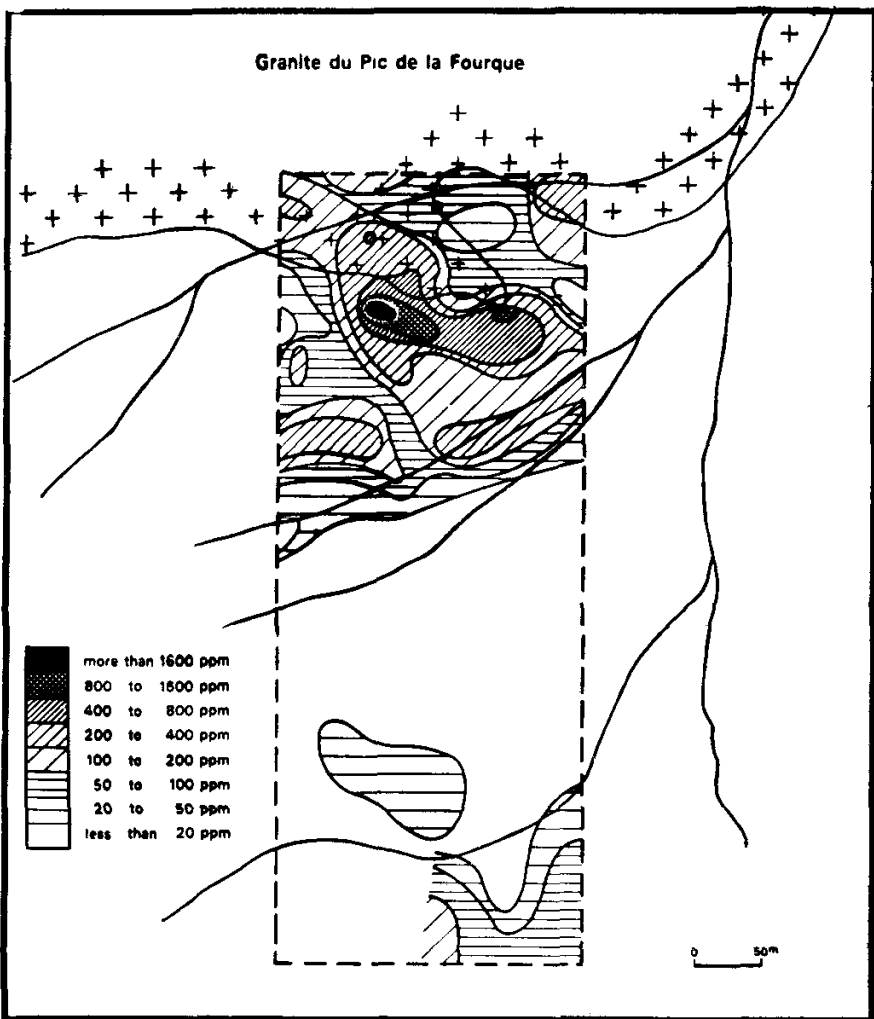
Подобные исследования были проведены в Пиренеях, вблизи рудопроявлений такого же типа. Для металлоидов получены сходные результаты, особенно для мышьяка и фтора. Распространение других металлов невелико и ограничивается образованием небольших вторичных ореолов. Метод в настоящее время применяется в региональном масштабе для опробования крупных известняковых поясов с плотностью опробования 4 пробы на 1 км².



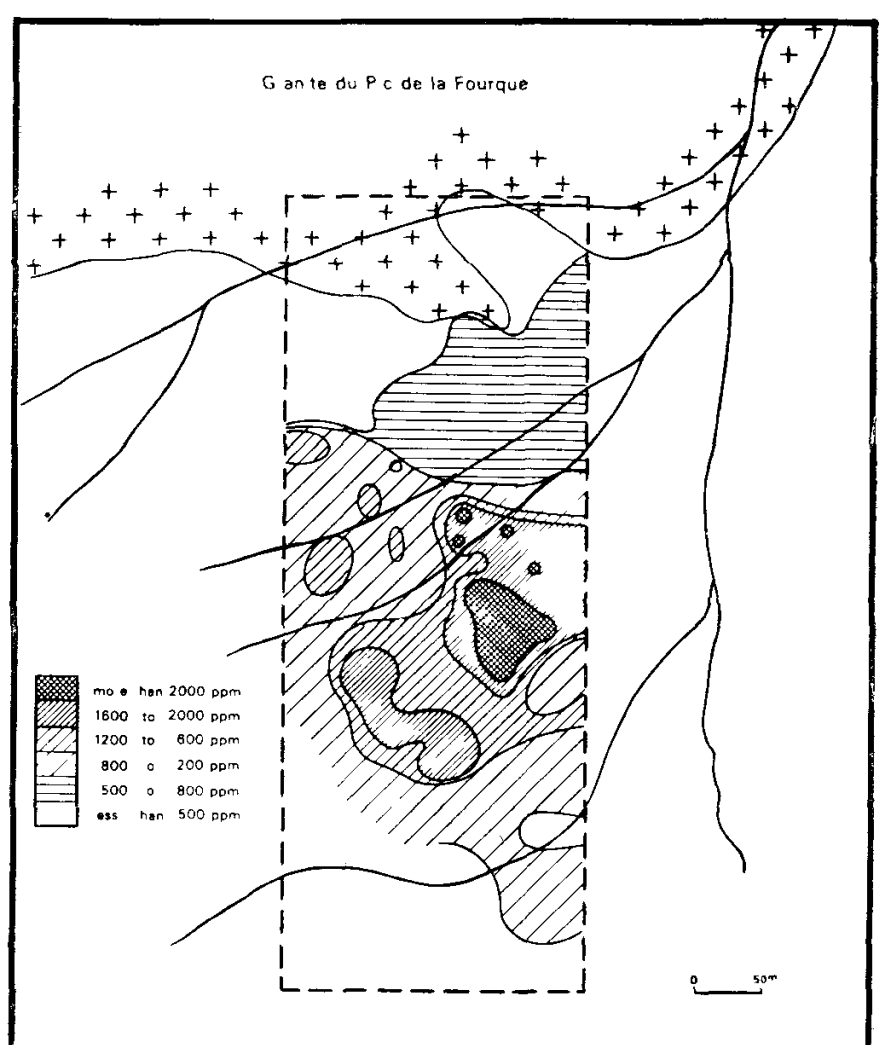
ФИГ. 4. Геохимические результаты опробования почв на цинк.



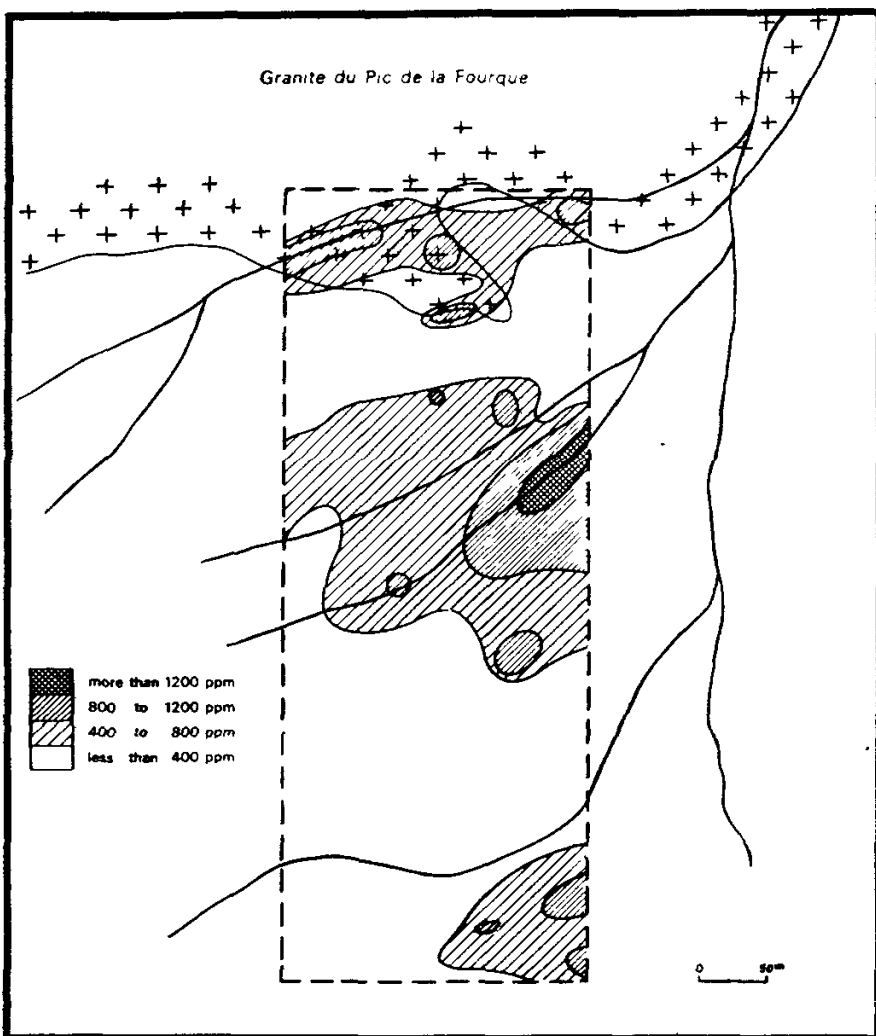
ФИГ. 5. Геохимические результаты опробования почв на свинец.



ФИГ. 6. Геохимические результаты опробования почв на мышьяк.



ФИГ. 7. Геохимические результаты опробования почв на фосфор.



ФИГ. 8. Геохимические результаты опробования почв на фтор.

С научной точки зрения опробование должно проводиться на различных сечениях батолита в целях уточнения формы первичных ореолов. Однако необходимо исследовать несколько интрузий, вскрытых на различных уровнях и (или) взять достаточное количество проб пород на различных расстояниях и глубинах от гранитов, чтобы располагать значительным количеством проб, отобранных в трех измерениях. Это затруднительно, особенно когда площадь опробования выходит далеко за пределы участка разбуривания рудного тела.

СРАВНЕНИЕ ГИДРОГЕОХИМИЧЕСКОГО МЕТОДА И МЕТОДА ДОННЫХ ОСАДКОВ ПРИ ПОИСКАХ РТУТИ

ВВЕДЕНИЕ

В течение последних нескольких лет широко применялись геохимические поиски с использованием ртути в качестве индикатора. Этот

возникают и другие спорные вопросы. Какое именно явление отображают ореолы металлоидов? Связаны ли они с минерализацией, формированием скарнов, контактовым метаморфизмом или гранитной интрузией? Для ответа на эти вопросы необходимо точно знать характер связи между рудными телами вольфрама, скарнами и гранитами. Эта взаимосвязь ставит интересную проблему для дальнейшего изучения рудообразования, включая концепцию «волн кислотных компонентов», высказанную Коржинским [5]. Изучение ореолов металлоидов, возможно, и приведет к решению этой проблемы, но, во всяком случае, пока мы видим, что эти три геологических тела взаимосвязаны и имеют совместные геохимические ореолы мышьяка, фтора и фосфора. Расширение объектов поисков и определение направления к ним с помощью ореолов полезны для геолога-поисковика.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fonteilles M., Guiraudie C., Passaqui B., Prouhet J. P., Un nouveau type de minéralisation en tungstène et sulfures dans les Pyrénées françaises, *Chronique des Mines et de la Recherche minière*, № 386, Sept. 1969, 255—262, 1969.
2. Fortescue J., *Exploration Architecture*, Geol. Surv. Canada, Paper 65—6, 4—14, 1965.
3. Grillot H., Béguinot J., Boucetta M., Rouquette C., Sima A., *Méthodes d'analyses quantitatives appliquées aux roches et aux prélèvements de la prospection géochimique*, Mémoire B.R.G.M., № 30, 1964.
4. Guitard G., Laffite P., *Les calcaires métamorphiques et les skarnes du Pic de Costabonne, Pyrénées Orientales*, *Sciences de la Terre*, VI, 57—137, 1958.
5. Korzhinsky D. S., *La théorie du zonage métasomatique*, Conférence à l'École des Mines de Paris, 19 avril 1967, 1967.
6. Korzhinsky D. S., *Bases physico-chimiques de l'analyse des paragenèses de minéraux*, Trad. B.R. G.M., № 2294, 1957.
7. Prouhet J. P., *Anglo-American Develops French Tungsten Mine*, *World Mining*, Feb. 1969, 22, № 2, 1966.

М. Деллаглио
Италия

метод может использоваться при поисках месторождений ртути и других металлов. Ртуть имеет парагенетические связи со многими элементами. Например, сульфидные руды — особенно эпи- и мезотермального типа — показы-

вают гораздо более высокое содержание ртути, чем вмещающие горные породы. Ртуть — наиболее благоприятный элемент для поисков, поскольку она может использоваться для определения местоположения скрытых рудных месторождений благодаря высокой степени летучести многих соединений ртути. Согласно Саукову [10] и Сергееву [11], газообразные ртутные ореолы, образовавшиеся вокруг скрытых месторождений, могут выходить на поверхность даже с глубины сотен метров. Газовое рассеяние ртути увеличивается в районах с высоким геотермальным градиентом, и поэтому геохимические поиски с использованием ртути в качестве индикатора могут применяться также при разведке геотермальных полей. Несколько лет назад исследователи Горнорудной лаборатории предприняли систематические исследования, связанные с поисками ртути. Исследования проводились с целью изучения новых (по сравнению с обычно использовавшимися) методов поисков. Эти исследования развивались по следующим направлениям:

- а) разработка аналитических методов определения ртути в природной воде, почве и аллювии;
- б) изучение гидрогеохимии ртути;
- в) шлиховые поиски с выявлением киновари в аллювии;
- г) геохимические поиски с использованием содержания ртути в аллювии.

При исследованиях были получены полезные сведения, касающиеся применения каждого из этих методов поисков. В данной статье полученные результаты обсуждаются с точки зрения методологии и полевых поисков.

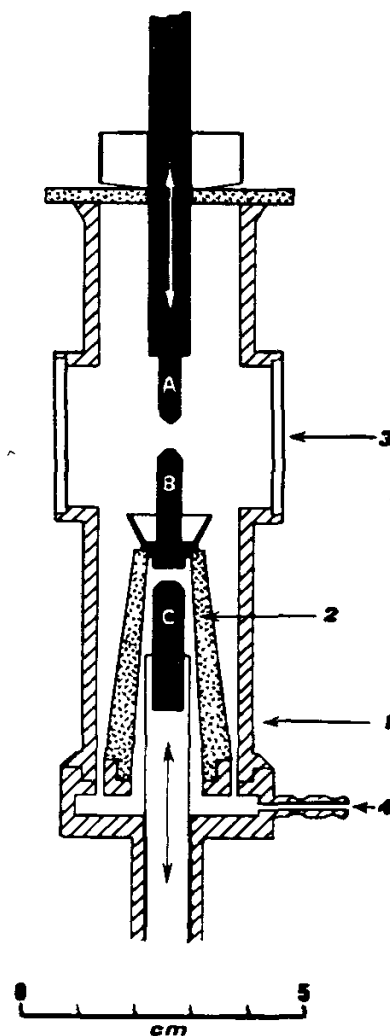
АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

Спектрографическое определение ртути в пробах аллювия по новому методу, характеризующемуся следующими особенностями:

1. Чувствительность, достаточная для определения фоновых содержаний, 10 млрд^{-1} .
2. Специфичность получения аналитических результатов, пригодных для исследований, даже когда пробы богаты органическим веществом.
3. Простота исполнения анализов.

Здесь описывается только сам процесс анализа, подробности методики приводятся в работе Деллаглио и др. [7].

Анализируемую пробу (0,2 г) помещают непосредственно в углубление электрода В (фиг. 1). Этот электрод устанавливается на огнеупорную подставку (2 на фиг. 1); контейнер закупори-

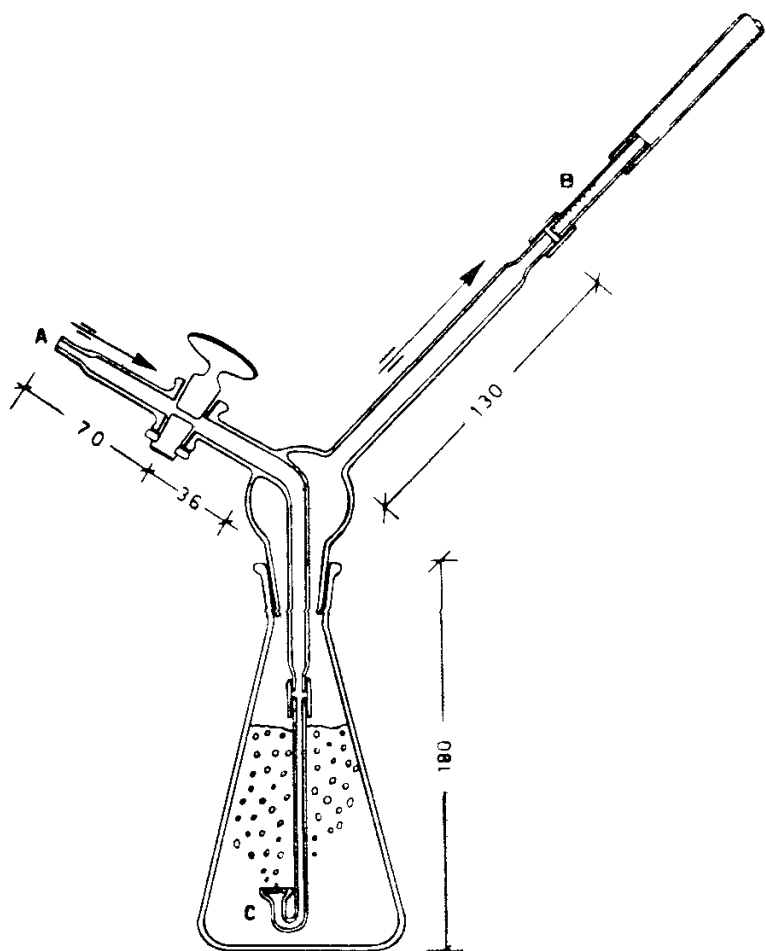


ФИГ. 1. Прибор для спектрографического анализа ртути.

вают и заполняют аналитически чистым аргоном.

Электроды А и В приводят в контакт, между электродами В и С возникает дуга в течение 10 с при 11 А. Затем быстро производится следующая операция: дуговой ток понижается до 4 А, электрод А отодвигается от электрода В и крышка спектрографа открывается. Через 5 с электрод С вводят в контакт с электродом В, отводя таким образом дугу. Через 15 с дуга гаснет и крышка закрывается. Одна и та же пластинка используется для регистрации стандартов со следующими содержаниями ртути: 0,01, 0,03, 0,1 и 0,3 млн^{-1} . Содержание ртути в пробах определяют путем визуального сравнения со стандартами.

Определение ртути в пробах воды. Извлечение и концентрация ртути из проб воды производится следующим образом. На месте опробования берут 450 мл воды в бутылку (объемом 500 мл) с притертой стеклянной пробкой. В аналитической лаборатории в пробу добавляют 20 мл 1 : 2 соляной кислоты с 10% SnCl_2 . Затем бутылку нагревают, при 90°C ртуть выделяет-



ФИГ. 2. Прибор для извлечения и концентрации ртути из проб воды.

ся в виде газа, как показано на фиг. 2. Из воды постоянно выделяются пузырьки воздуха (1000 мл воздуха за 20 м). Затем воздух, содержащий ртуть, пропускают через гранулированный кварц (В на фиг. 2), покрытый AuCl_2 и Au. На золоте оседает вся ртуть, содержавшаяся в воде. Потом кварц анализируют спектрографическим методом, описанным выше. Определение ртути можно проводить также методом атомной абсорбции. Дополнительные сведения об извлечении ртути из проб воды можно почерпнуть в работах Деллаглио и Грагнери [6] и Деллаглио [4].

ГИДРОГЕОХИМИЯ РТУТИ

Полевые и лабораторные исследования проводились для лучшего понимания гидрогеохимии ртути.

Было проанализировано на ртуть более 300 проб природной воды из Тосканы и Латиума. На фиг. 3 показано распределение ртути в водах рек Омброне и Паглия, обе реки радиальны по отношению к ртутному району горы Амиата, но их геологические и минералогические характеристики различны. Большинство ртутных рудных тел и рудников Италии сосредоточено в бассейне реки Паглия. В бассейне

реки Омброне киноварь обнаружена по реке Орциа, а сурьма добывается в низовье самой реки Омброне.

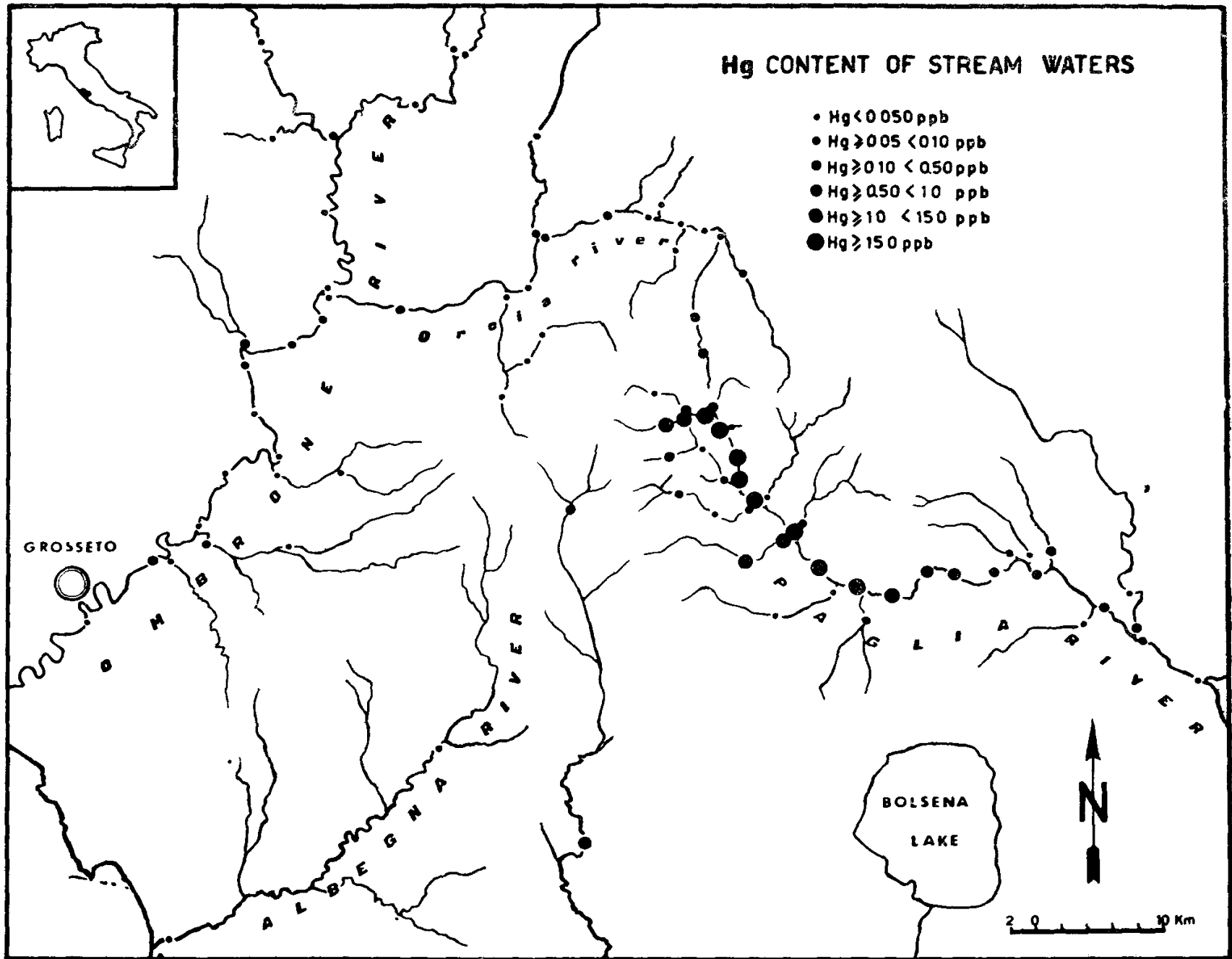
Пробы, взятые в бассейне реки Омброне, показывают фоновые содержания ртути от $0,01 \text{ млрд}^{-1}$ до $0,05 \text{ млрд}^{-1}$. Некоторые образцы содержали $0, x \text{ млрд}^{-1}$, т. е. в десять раз больше фоновых. Это говорит о том, что транспортировка ртути в естественных водах может играть важную роль как для образования вторичных потоков и ореолов, так и в процессах минералообразования.

Очень высокие содержания ртути, до 100 млрд^{-1} , были обнаружены в водах бассейна реки Паглия. Столь высокие содержания обусловлены, очевидно, горными работами и промышленными отходами. Следует отметить, что гидрогеохимический ртутный поток, начинающийся на горе Амиата, постепенно ослабевает вниз по течению реки и полностью исчезает перед ее впадением в Тибр.

Вышеприведенный факт подчеркивает одну из важнейших черт гидрогеохимии ртути, а именно: ртуть, содержащаяся в естественных водах, быстро поглощается всеми твердыми веществами, с которыми она контактирует. Аллювием она поглощается почти полностью менее чем за 1 ч, что проверено путем добавления радиоактивного индикатора ^{203}Hg к естественным водам, содержащим аллювиальные вещества во взвешенном состоянии. Больше ртути поглощается более мелкими фракциями, а скорость поглощения зависит в большей степени от природы и площади поверхности твердых веществ, чем от типа минералов, составляющих аллювий.

Исследованные пробы воды были проанализированы на все основные компоненты. Было установлено, что коэффициенты корреляции между ртутью и каждым из основных компонентов не значимы. Этим ртуть отличается от других рассеянных элементов, таких, например, как уран. На фиг. 4 содержания ртути нанесены против данных об электропроводности. Можно заметить, что между этими двумя параметрами корреляция отсутствует. При одном и том же значении электропроводности содержание ртути колеблется более чем на 3 порядка.

Приведенные данные свидетельствуют о двух особенностях гидрогеохимии ртути [1]. Статистической корреляции между ртутью и каждым из основных компонентов не существует главным образом потому, что в растворе ртуть гораздо менее устойчива, чем все основные компоненты. Другими словами, геохимическая мобильность ртути довольно ограничена. Когда ртуть попадает в свежую воду, она не может



ФИГ. 3. Распределение ртути в пробах воды из ручьев бассейнов рек Омброне и Паглия, Тоскана.

переместиться на значительное расстояние, так как легко поглощается всеми твердыми телами, с которыми она входит в контакт [2]. Быстрое поглощение ртути аллювием приводит к образованию заметных и постоянных геохимических ореолов в донных осадках.

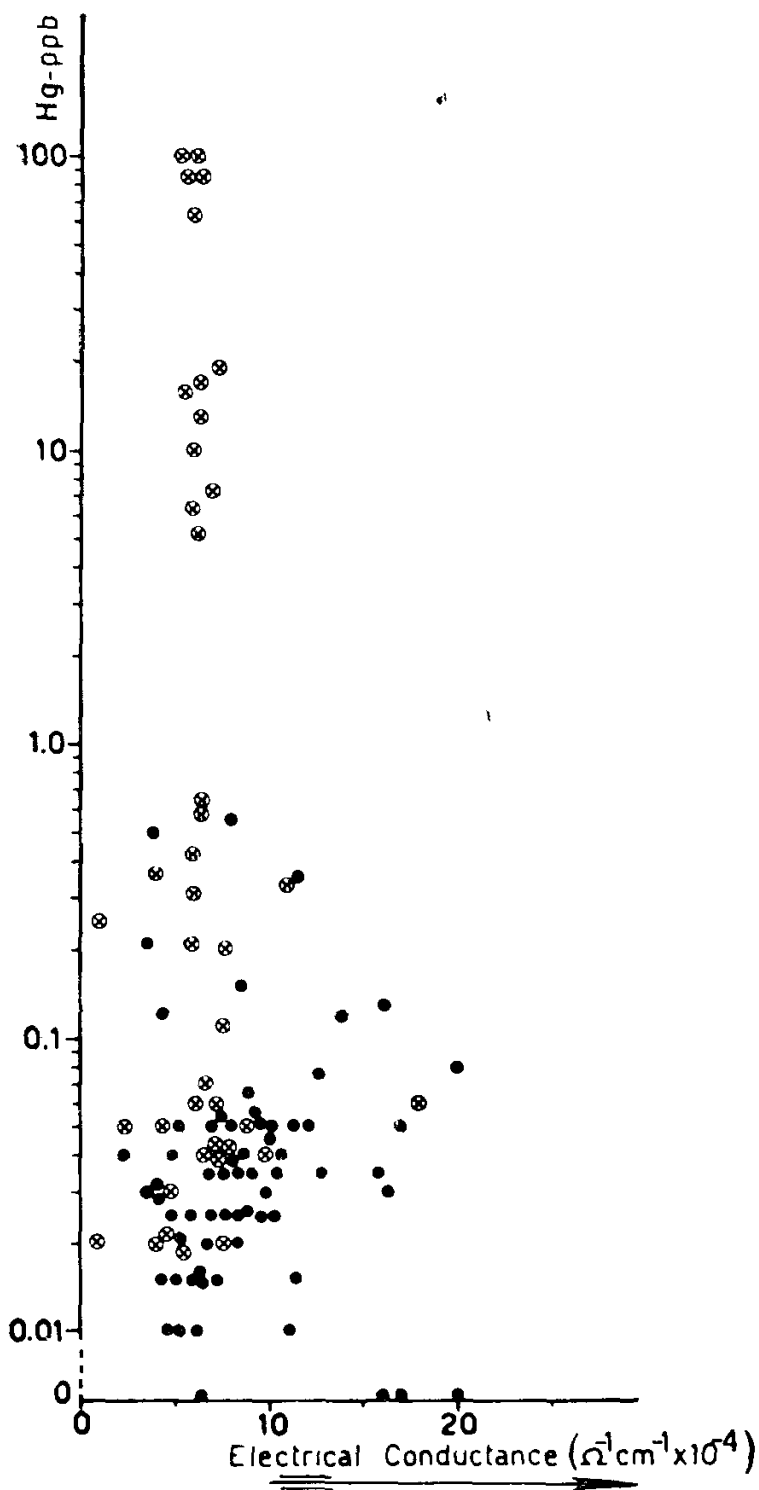
МИНЕРАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ КИНОВАРИ В ПОТОКАХ РАССЕЯНИЯ

Этот метод поисков был исследован, а затем широко применялся учеными Минералогической секции Горнорудной лаборатории CNEN. Высокий удельный вес киновари упрощает ее выделение даже из проб с низким содержанием этого минерала. Определение киновари в тя-

желых диамагнитных фракциях донных осадков просто и надежно.

Определение киновари в донных осадках дает возможность локализовать обнаженные рудные тела киновари. Однако для определения роли киновари как минерала-индикатора других сульфидных руд проведено недостаточно исследований. Судя по проведенным до настоящего времени исследованиям, можно сказать, что в эпи- и мезотермальных сульфидных рудах имеется достаточное количество этого минерала для образования ореолов киновари [2]. В районе Тосканы было проведено несколько исследовательских работ, в которых киноварь использовалась в качестве индикатора [1, 2].

Здесь следует подчеркнуть одну общую черту, вытекающую из вышеприведенных исследований. Хотя киноварь метастабильна в поверх-



ФИГ. 4. Содержание ртути в зависимости от электропроводности в пробах воды из бассейнов рек Омброне и Паглия, Тоскана.

ностных условиях, окисляется она достаточно медленно и образует обширные механические ореолы и потоки рассеяния, являясь одним из наиболее устойчивых сульфидов в поверхностных условиях. Протяженность заметных аномальных потоков вниз по течению от месторождений невелика, поскольку киноварь хрупкая и легко разрушается на очень мелкие частицы. Мельчайшие зерна (<200 меш) трудно определить при минералогическом анализе.

Исследования, проведенные Минералогической секцией с использованием киновари в ка-

честве минерала-индикатора, привели к открытию новых месторождений киновари; при проведении дальнейших исследований некоторые месторождения могут оказаться промышленно важными.

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ПОИСКИ ПУТЕМ ОПРОБОВАНИЯ НА РТУТЬ ДОННЫХ ОСАДКОВ

Имеется целый ряд причин, позволяющих полагать, что потоки рассеяния ртути в донных осадках более заметны и устойчивы, чем потоки киновари и гидрогеохимические потоки. Причины для такого предположения следующие:

а. Первичные ореолы способствуют образованию вторичных ореолов и потоков рассеяния ртути. Согласно Сергееву [11] и Федорчуку [8, 9], большая часть ртути в первичных ореолах находится в металлическом состоянии или рассеяна в других минералах. Такие разнообразные соединения не могут быть обнаружены по определениям киновари.

б. Гидрогеохимические ореолы ограничены по размеру, поскольку ртуть, как уже отмечалось выше, легко поглощается аллювием. Гидрогеохимические ореолы помогают также обнаружить заметные и протяженные геохимические аномалии в донных осадках.

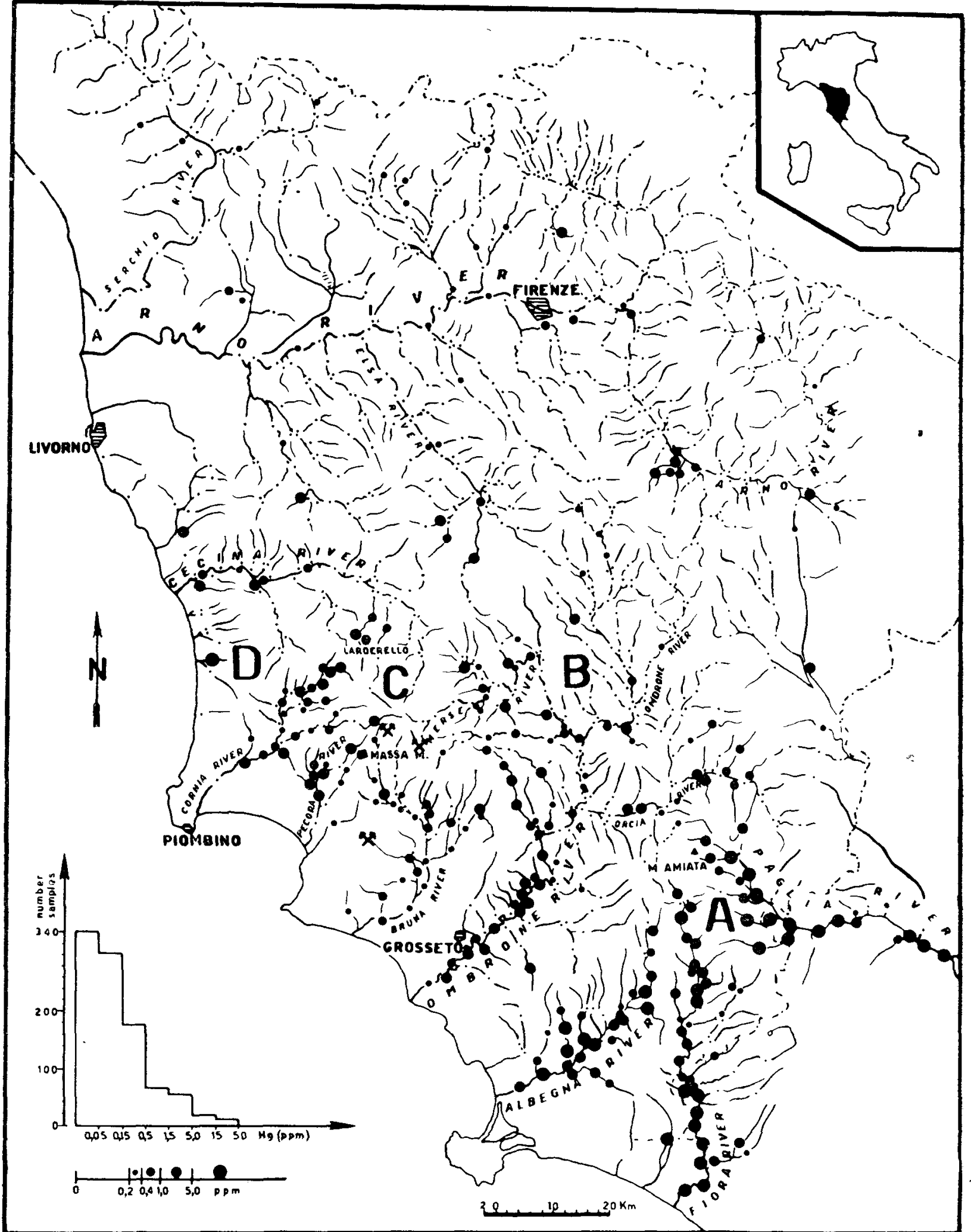
в. Киноварь — хрупкий минерал и легко дробится на мелкие частицы, которые трудно определить при минералогических исследованиях. Однако они легко обнаруживаются при химическом анализе.

Из геохимических исследований на ртуть, проведенных в Италии, наиболее интересна работа, проведенная в региональном масштабе в Тоскане. Со времени опубликования результатов этой работы [5] были открыты новые рудные тела киновари. Достигнутые результаты представляют интерес с точки зрения геохимии и поэтому кратко приводятся ниже.

В Тоскане в 1962 г. были проведены региональные исследования на уран, поэтому авторы имели под рукой пробы аллювия. По правильной сети на площади 20 тыс. км² при средней плотности одна проба на 20 км было собрано около 1000 проб.

Ртуть определялась во фракции менее 0,1 мм описанным выше спектрографическим методом.

Гистограмма и геохимическое распределение ртути в аллювии приведены на фиг. 5. Эти данные показывают заметную корреляцию между районами с аномальными содержаниями и районами, характеризующимися гидротер-



ФИГ. 5. Гистограмма и географическое распределение ртути примерно в 1000 проб донных осадков, собранных по всему району Тосканы (20 тыс. км²).

мальными явлениями. И наоборот, все районы, в которых такие явления отсутствуют, показывают нормальные содержания ртути независимо от типа геологических формаций. Распределение содержаний ртути указывает на следующие районы аномалий (А, В, С и D на фиг. 5).

А. Заметные аномалии встречаются в бассейнах рек Албегна, Фиора и Паглия. Обнаружено, что в аллювии этих бассейнов наиболее резко обнаруживаются аномальные содержания по сравнению с содержаниями в аллювии по всему району Тосканы. Реки текут с южного склона горы Амиата, где сконцентрировано большинство рудных тел киновари и расположены рудники. В нижней части бассейна реки Фиора, ниже стибнитовых залежей Манциано, месторождений ртути не обнаружено. Высокое содержание ртути в аллювии, вероятно связано с месторождениями сурьмы и баритовыми жилами в триасовых сланцах. Аномалии протягиваются вниз по течению реки на расстояние около 10 км.

В. Разрозненные аномалии были обнаружены в бассейне реки Омбронне. Наиболее важные из них установлены в бассейне реки Мерсе, левого притока реки Омбронне, где залежи ртути ранее не были известны. В районе этих геохимических аномалий Бенвенью и Бронди [1] в донных осадках определено повышенное содержание киновари. Впоследствии в том же районе Бронди и др. [2] были открыты новые залежи киновари.

Несколько разрозненных аномалий было обнаружено около горста горы Кетона и по соседству с термальными источниками в районе Раполано.

С. В бассейнах рек Кечина, Корниа и Пекора не обнаружено ртутных месторождений, но известны высоко-, средне- и низкотемпературные сульфидные месторождения. Вблизи высокотемпературных пиритовых отложений Никкиолета и Бокхедиано содержания ртути в аллювиальных пробах низкие. Однако в среднем течении реки Пекора и в верхнем и нижнем течении реки Корниа были установлены заметные аномалии.

После этих исследований были открыты новые сульфидные месторождения в бассейне реки Пекора, причем некоторые из них могут иметь промышленное значение (Мацонкини, устное сообщение).

Д. В Фоссо-ди-Болгери в одной пробе оказалось высокое содержание ртути. Ртутных месторождений в этом районе не было обнаружено, но вверх по восстанию флишевые породы со стороны участка опробования содержат магнетитовые жилы и гидроокислы железа.

Дальнейшие поисковые работы, как минералогические, так и геохимические, подтвердили наличие этой аномалии, но источник ее пока не установлен.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

За последние несколько лет были проведены методические и прикладные исследования, касающиеся геохимических поисков ртути. Были разработаны и применялись новые аналитические методы определения ртути в аллювии и пробах воды. Кроме того, проверялись различные методы поисков, а именно: гидрогеохимические поиски, шлиховой метод по определению киновари в аллювии и почвах и геохимические исследования путем спектрографического анализа проб донных осадков.

Полученные результаты можно обобщить следующим образом:

а. Изучение гидрогеохимии ртути показало, что миграция ртути в экзогенной среде определяется в значительной степени естественными водами. Однако гидрогеохимические исследования ртути несколько ограничены. Когда ртуть попадает в естественные воды, она проявляет заметную тенденцию к поглощению всеми твердыми веществами, с которыми она входит в контакт. Гидрогеохимические ореолы рассеяния не обладают большой протяженностью в водных потоках и поэтому являются слабыми индикаторами минерализации при крупномасштабных поисках.

б. Геохимические исследования по опробованию донных осадков оказались наиболее эффективными при региональных рекогносцировочных работах, поскольку аномалии ртути в аллювии интенсивны и хорошо заметны. Геохимические исследования, проведенные по всей Тоскане, при которых было проанализировано 1000 проб аллювия, взятых по правильной сети и покрывших более 20 тыс. км², не только фиксировали все известные месторождения ртути, но выделили также и новые аномальные площади. После проведения этих работ были открыты новые рудные месторождения, причем некоторые из них могут иметь промышленное значение. Кроме того, использование ртути как элемента-индикатора позволило выявить все низко- и среднетемпературные сульфидные месторождения, однако содержание ртути в аллювии районов высокотемпературных сульфидных отложений оказалось совершенно нормальным.

в. Исследования путем определения киновари в аллювии и почвах представляет собой полезный метод поисков, особенно в районах

выявленных аномалий. Определения в данном случае можно делать быстро и с помощью простой техники. Именно этим методом Бронди и др. [2] открыли рудопроявления киновари.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Benvegnu' F., Brondi A.*, Messa a punto di metodi di prospezione mineralogica, *Rend. Soc. Mineral. Ital.*, XXI, 1—23, 1965.
2. *Brondi A., Anselmi B., Benvegnu' F., Ferretti O.*, Prospezione mineralogica alluvionale per cinabro nel bacino del Merse, *Industria Mineraria*, XIX, agosto 1—9, 1968.
3. *Dall'Aglio M.*, Distribuzione del mercurio nelle acque superficiali, *Atti Soc. Toscana Sci. Nat.*, Pisa, LXXIII, 577—595, 1966.
4. *Dall'Aglio M.*, The Abundance of Mercury in 300 Natural Water Samples from Tuscany and Latium, in *Origin and Distribution of the Elements*, L. H. Ahrens, editor, Pergamon Press, 1065—1081, 1967.
5. *Dall'Aglio M., Da Rott R., Orlandi C., Tonani F.*, Prospezione geochimica del mercurio, *Industria Mineraria*, sett. XVII, 1—9, 1966.
6. *Dall'Aglio M., Gagnari R.*, Determinazione del mercurio nelle acque naturali, *Atti Soc. Toscana Sci. Nat.*, Pisa, 553—576, 1966.
7. *Dall'Aglio M., Tonani F., Visibelli D.*, A New Spectrographic Method for the Determination of Mercury in Alluvium and Soil Samples, XV Colloquium Spectroscopicum Internationale, Madrid, May 1969, 1970.
8. *Fedorchuk V. P.*, Origin of Native Mercury, *Geochemistry*, № 3, 345—352, 1958.
9. *Fedorchuk V. P.*, Formation of Aureoles of Direct Ore Indicators Around Mercury Deposits, *Geochemistry*, № 10, 1010—1020, 1961.
10. *Сайков А. А.*, Геохимия ртути, Труды ин-та геол. наук, вып. 78, минералого-геохимическая сер., № 17, Изд-во АН СССР, М., 1946.
11. *Sergeev E. A.*, Methods of Mercurimetric Investigation, *Internat. Geol. Rev.*, 3, № 2, 93—99, 1961.

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ПОИСКИ БАРИТОВЫХ И ФЛЮОРИТОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Г. Х. Фридрих,
У. Л. Плюгер

Технический университет,
Ахен, ФРГ

ВВЕДЕНИЕ

В ФРГ и Испании исследовалась возможность использования геохимических методов при поисках баритовых и флюоритовых месторождений. Изучались различные типы месторождений. В настоящей статье описан предварительный этап непрерывной развернутой программы исследований, проводимых исследовательской группой прикладной геохимии и Техническим университетом в Ахене.

БАРИТОВОЕ МЕСТОРОЖДЕНИЕ ДРЕЙСЛАР

Северо-восточная часть Рейнских Сланцевых гор, где находится месторождение Дрейслар, сложена слабо метаморфизованными складчатыми толщами граувакк и сланцеватых глин, относящихся к нижнему карбону (кулм). Само месторождение расположено в центре крупной тектонической зоны разлома Альтенбюрен—Келлервальд, простирающегося в северо-западном направлении.

Геология этого месторождения рассматривалась Куликом [2], Пилгером и Вайсером [3],

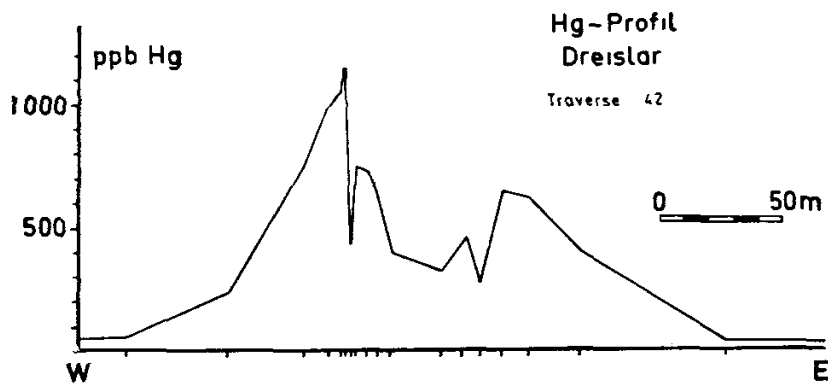
Шолем [5], которые описали рудное тело как состоящее из двух жил — жила № 1, приуроченная к северо-западной тектонической структуре, и жила № 2, связанная с разломом, идущим с севера на юг.

Добываемая руда состоит в основном из барита с небольшим количеством кварца и сидерита, и следами гематита, пирита, халькопирита и галенита. Барит содержит 1,17—4,23% SrSO_4 . Особый интерес представляет присутствующая в барите ртуть, содержание которой изменяется от 1200 млрд⁻¹ до 250 млн⁻¹.

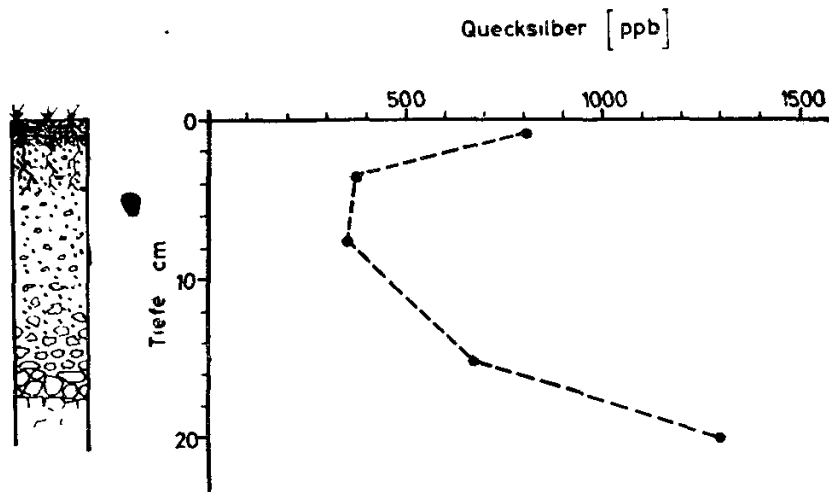
Пробы руды и породы отбирались из подземных выработок и скважин. Пробы почвы были взяты на глубине 5—20 см с интервалом 10 м вдоль линий восток — запад около известного месторождения и на участках за его пределами.

Результаты. Ртуть определялась методом атомной абсорбции с помощью двухкамерного аппарата, разработанного исследовательской группой прикладной геохимии в Техническом университете Ахена [4].

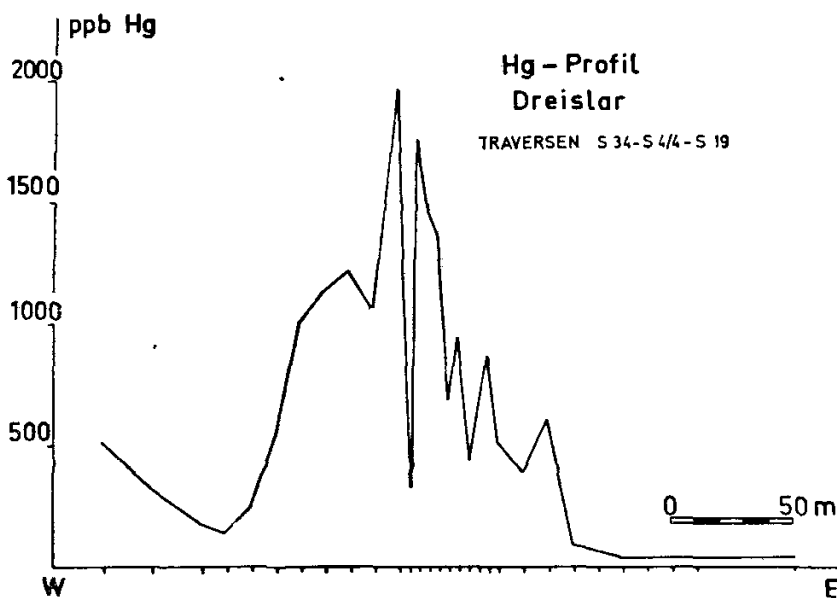
На фиг. 1 и 2 показаны результаты исследования почв; пробы взяты на юго-западном профиле, пересекающем жилу № 1 и жилу № 2. Содержание ртути в почвах, перекрывающих



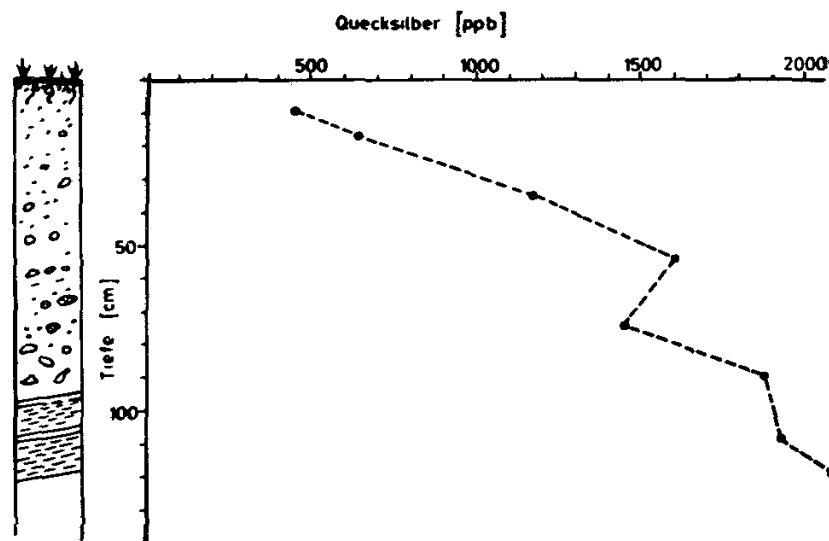
ФИГ. 1. Распределение ртути в почвах, глубина 0—20 см, вдоль профиля 42, баритовое месторождение Дрейслар, ФРГ.



ФИГ. 3. Распределение ртути в почвенном профиле над баритом, залегающим на глубине около 2 м, Дрейслар, ФРГ.



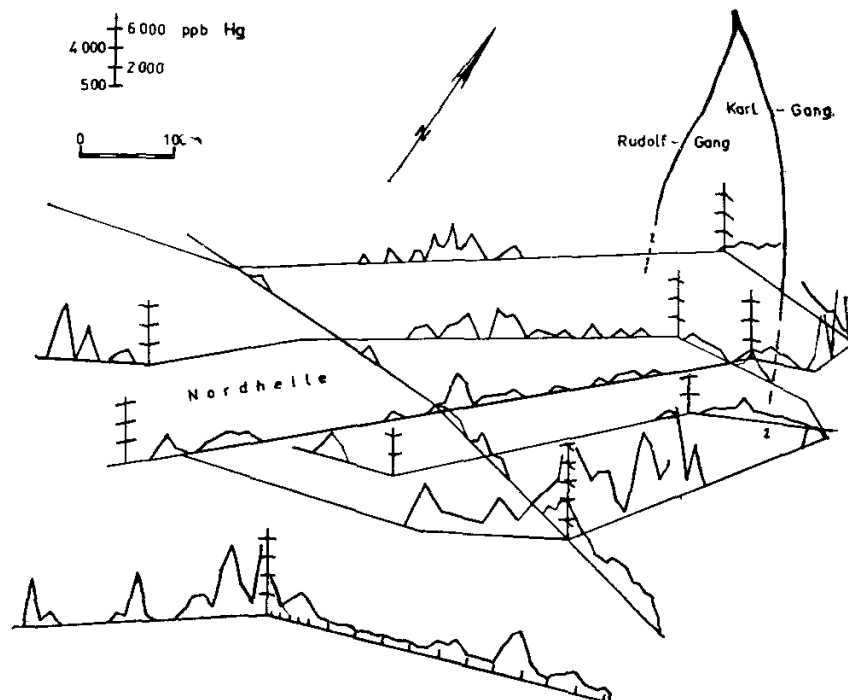
ФИГ. 2. Распределение ртути в почвах, глубина 0—20 см, вдоль профиля 34, баритовое месторождение Дрейслар, ФРГ.



ФИГ. 4. Распределение ртути в почвенном профиле над баритовой минерализацией, залегающей на глубине около 2 м, Дрейслар, ФРГ.

барит, изменяется от 500 млрд⁻¹ до 2000 млрд⁻¹, фоновое содержание — от 30 млрд⁻¹ до 90 млрд⁻¹.

На фиг. 3 и 4 показаны типичные профили почв над баритом, залегающим на глубине около 2 м. Особый интерес представляет повышение содержания ртути в направлении руды. Распределение ртути в почвах вдоль линий восток—запад к югу от месторождения показано на фиг. 5; на южном продолжении жилы № 2 ртутной аномалии не встречено. Аномалия с содержанием ртути до 2200 млрд⁻¹ отмечена в 200—300 м к западу от точки, ниже которой поставлен вопросительный знак на фиг. 5. При бурении на этом участке была обнаружена баритовая минерализация.



ФИГ. 5. Сводная карта расположения баритовых жильных месторождений Дрейслар и распределения ртути в почвах по линиям широтного направления в районе Нордхелле, южнее известной баритовой минерализации.

ФЛЮОРИТОВЫЙ РУДНИК ОСОР, ИСПАНИЯ

Рудник Осор находится в Испании, провинция Жерона (Каталония), на расстоянии около 100 км к северо-востоку от Барселоны. Месторождение располагается южнее реки Осор между Осором и Англесом. Рудник Осор — крупнейший флюоритовый рудник в Испании — производит также свинец и цинк.

Породы этого района представлены в основном палеозойскими кристаллическими сланцами, интродуцированными гранитами. Одна из примечательных особенностей района — разлом, идущий в направлении с востока на запад. Месторождения Осор структурно относятся к этому разлому и представлены жилами выполнения. На верхних горизонтах разработок известна только одна жила, она наклонена к югу на $70-80^\circ$. На нижних горизонтах обнаружено две жилы: одна полого падающая на юг, а другая — на север под углом $50-60^\circ$. Зона оруденения простирается на 3 км в направлении с востока на запад, имеет ширину 1—14 м и прослеживается по падению на 250 м.

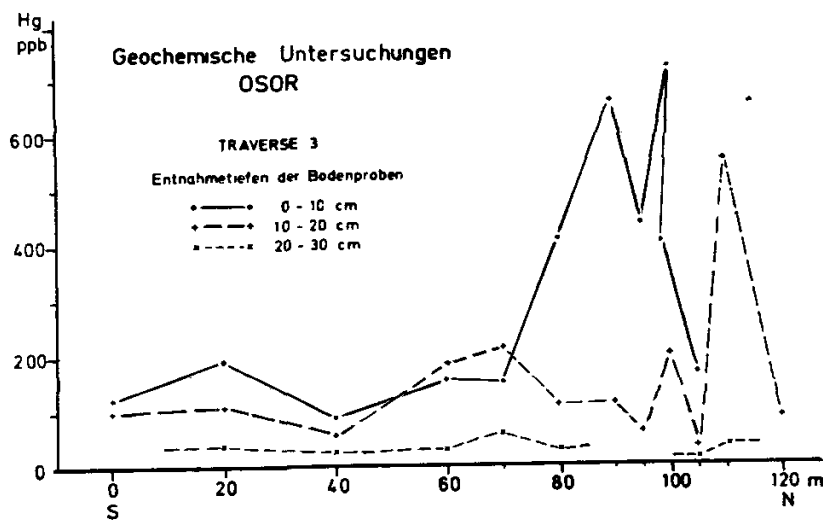
Состав добываемой руды 50—60% флюорита, 30—40% кальцита, барита и кварца, а также до 10% сфалерита и галенита, содержание которых возрастает с глубиной.

Геохимические исследования в Испании были начаты в конце 1969 г. с целью изучения возможности применения геохимических методов поисков в районе рудника Осор. Основная часть геохимических исследований состояла в определении содержания ртути в характерных минералах жил и в почвах, а также в определении содержания фтора в водах ручьев.

Сначала отдельные минералы, такие, как сфалерит, флюорит и барит, исследовались с целью определения в них среднего содержания ртути. Ртуть была установлена также в некоторых пробах боковых пород (граниты).

Во флюорите содержание ртути изменяется от 40 млрд^{-1} до 350 млрд^{-1} , в барите оно составляет около 60 млрд^{-1} , а в сфалерите колеблется от 80 млрд^{-1} до 160 млрд^{-1} , повышаясь с глубиной. Ясно, что ни один из этих минералов не является основным носителем ртути, но боковые породы поблизости от минеральных жил имеют относительно высокое ее содержание (до 1200 млрд^{-1}).

В районе Осор было отработано восемь профилей с севера на юг над минерализованной жилой. Чтобы существовала уверенность в достижении фона, почвенные профили были продолжены за зону минерализации. Район Осор имеет сложный рельеф и почва здесь



ФИГ. 6. Распределение ртути в почвах от поверхности до коренной породы, профиль 3 (см. фиг. 7), рудник Осор, Испания.

неустановившегося типа, без отчетливых горизонтов и часто содержащая обломки выветренного гранита. Почвенные горизонты обычно маломощные (10—15 см). Пробы почв брались на глубине 5—20 см с интервалами 10 м.

Определение ртути производилось в Ахене по почвенным пробам (фракция минус 80 меш). Кроме того, определялись цинк и свинец. Выводы можно суммировать следующим образом.

1. Содержание ртути в поверхностном горизонте А обычно выше, чем в нижнем горизонте С (фиг. 6). Отношение ртути в горизонте А к ртути в горизонте С 4 : 1, а вблизи зоны минерализации 12 : 1.

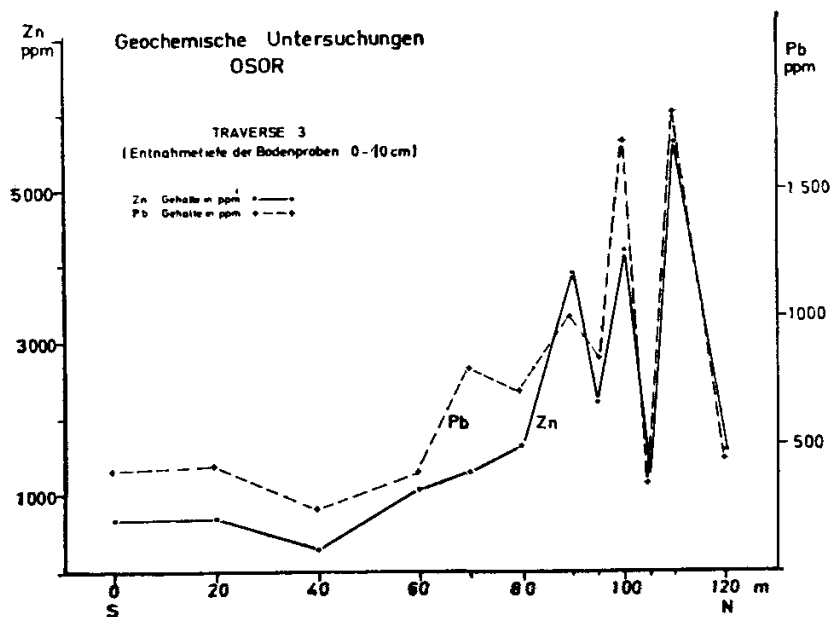
2. Все профили, пересекающие известную флюоритовую минерализацию, показывают аномальное рассеяние ртути, свинца и цинка в почвах над жилой зоной (фиг. 7, 8 и 9). Аномальные значения ртути изменяются от 400 млрд^{-1} до 1200 млрд^{-1} ; фоновые уровни от 60 млрд^{-1} до 100 млрд^{-1} .

3. Наблюдается хорошая корреляция между аномальными содержаниями ртути и аномальными содержаниями свинца и цинка в почвах над известной флюоритовой минерализацией.

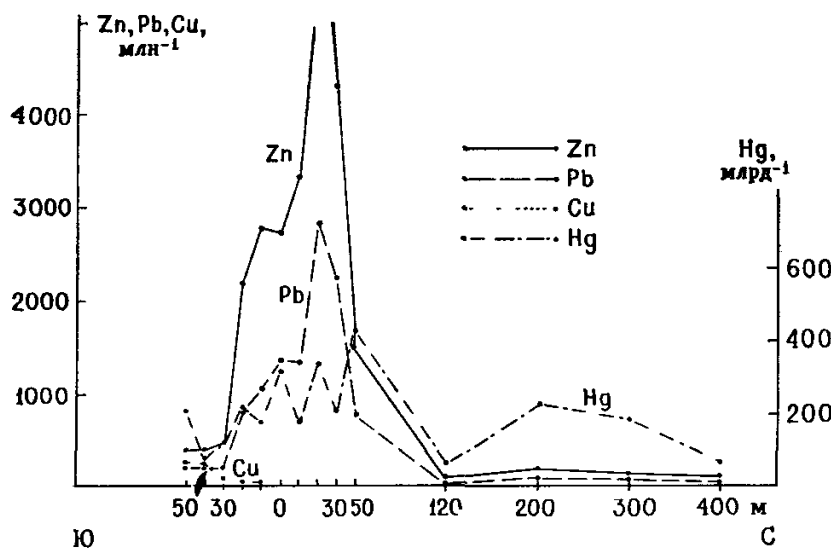
4. При геохимических поисках следует брать почвы близко от поверхности, так как они обеспечивают лучшую контрастность аномалий ртути.

Распределение фтора в водах ручьев исследовалось в гидросети района рудника Осор (фиг. 10) с целью изучения возможности использования для рекогносцировки фторного метода. Содержание фтора в воде определялось в полевых условиях.

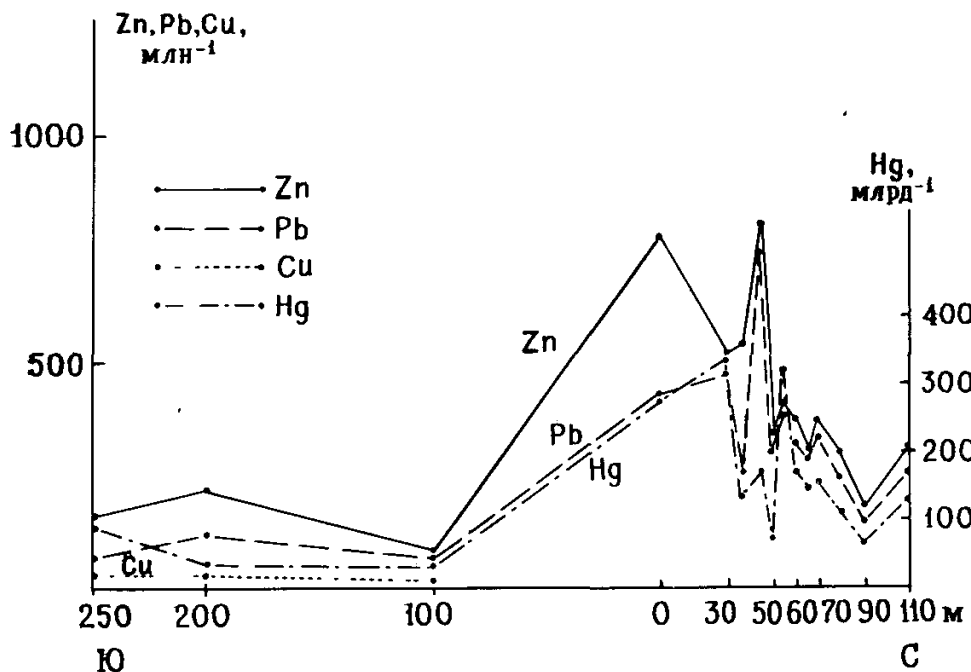
Содержание фтора в водах ручьев, протекающих через зону минерализации, показало



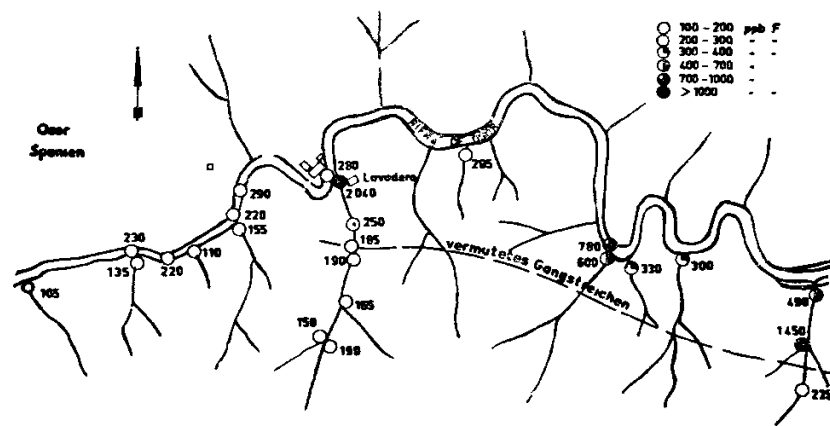
ФИГ. 7. Распределение свинца и цинка в почвах, глубина 0—10 см, вдоль профиля 3, район рудника Осор.



ФИГ. 8. Распределение цинка, свинца, меди и ртути в почвах, глубина 0—10 см, вдоль профиля 1, район рудника Осор.



ФИГ. 9. Распределение цинка, свинца и ртути в почвах, глубина 0—10 см, район рудника Осор.



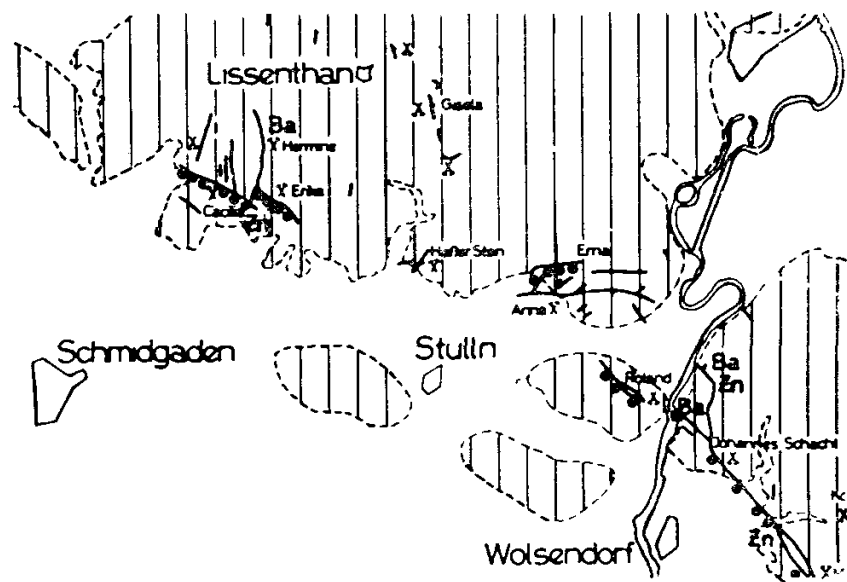
ФИГ. 10. Распределение фтора в водах ручьев дренажной системы рудника Осор.

аномальные значения, которые изменяются от 250 млрд⁻¹ до 1450 млрд⁻¹, фоновые значения колеблются от 100 млрд⁻¹ до 200 млрд⁻¹. Следовательно, этот метод можно рекомендовать для рекогносцировочных работ.

ФЛЮОРИТОВОЕ РУДНОЕ ПОЛЕ ВЁЛЗЕНДОРФ, ФРГ

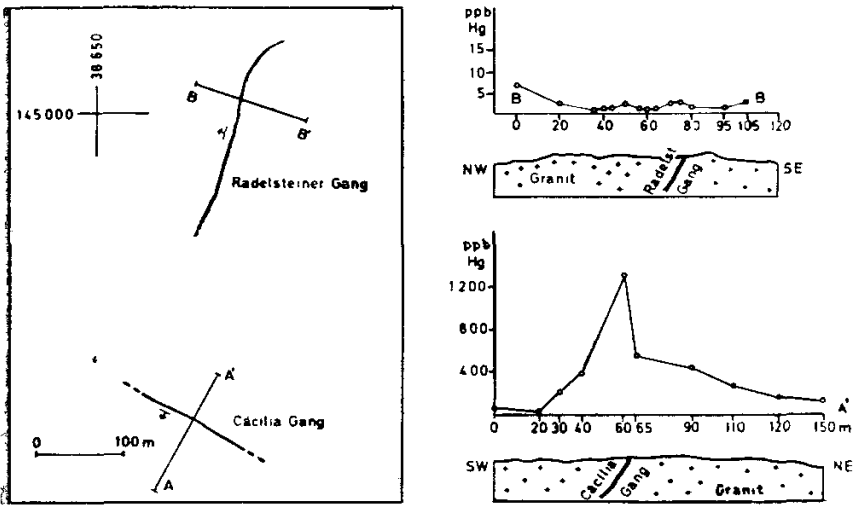
Распределение ртути в почвах изучалось во флюоритовом рудном поле Вёлзендорф, которое находится в 100 км к северу от Регенсбурга. Геология и минералогия этих образований изучались в 1966 г. Прейсом и Циром. Они отметили следы ртути во флюорите, барите и сфалерите и охарактеризовали флюоритовую минерализацию как жильную в ассоциации с палеозойскими гранитами восточной Баварии.

Пробы почв отбирали по профилю, пересекающему известные флюоритовые жилы. Наи-



ФИГ. 11. Карта размещения флюоритовых месторождений жильного типа в районе Вёлзендорф, ФРГ.

Точками отмечены пункты, где было определено содержание ртути в жильных минералах; заштрихованные участки отмечают изверженные и метаморфические породы.



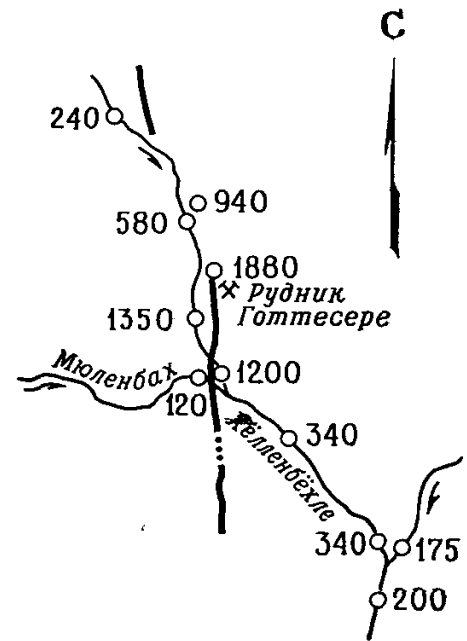
ФИГ. 12. Карта распространения жил Цецилия и Радельштейн.

Справа — распределение ртути в почвах вдоль профилей В — В' и А — А' над флюоритовыми жилами, район Велзендорф, ФРГ.

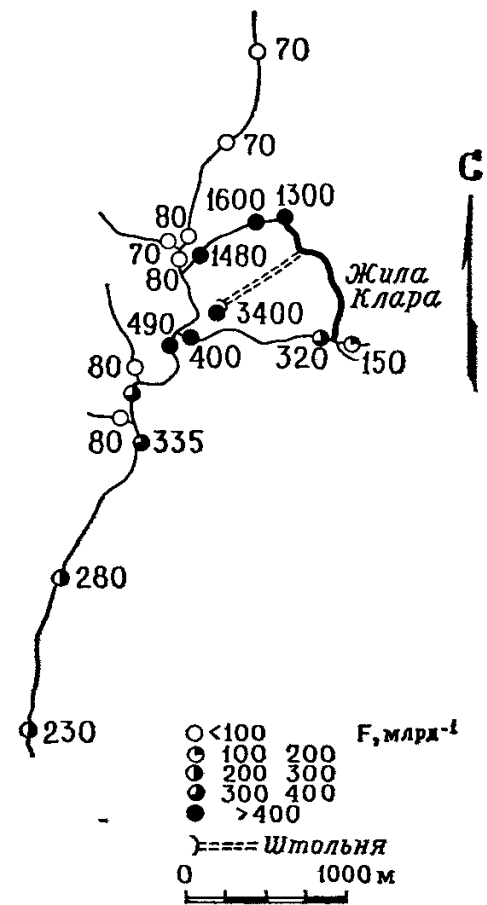
большой интерес представляет распределение ртути в почвах над жильными системами, имеющими направление с юга на восток и с севера на юг (фиг. 11 и 12). Профиль, пересекающий жилу Цецилия с севера на юг, показывает высокие аномальные значения ртути — до 1320 млрд^{-1} , в то время как линия, пересекающая жилу Радельштейн с севера на юг, не показывает ртутной аномалии. Над этой линией показатели содержания ртути очень низкие, как, например, вдоль профиля В — В' (фигура 12) — от 3 млрд^{-1} до 8 млрд^{-1} . Согласно Прейсу и Циру, жила Цецилия включает небольшое количество сфалерита третьей генерации, который содержит до 2000 млрд^{-1} ртути. В жилах, простирающихся с севера на юг, эта генерация сфалерита не встречается.

ФЛЮОРИТОВЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ В РАЙОНЕ ШВАРЦВАЛЬДА, ФРГ

В трех районах Шварцвальда, ФРГ, исследовалось распределение фтора в водах ручьев. В первом районе (фиг. 13) флюорит является основным минералом в серии жил, протягивающихся с севера на юг (жилы Урберг, рудник Готтесере) и залегающих в палеозойских гранитах. Второй район (фиг. 14) — рудник Клара — также представляет собой месторождение жильного типа в гранитных породах, но в минеральном составе преобладает барит. В районе Менценшванд (фиг. 15) флюорит является жильной породой в ураноносной пегматитовой жиле, которая также связана с палеозойскими гранитами.



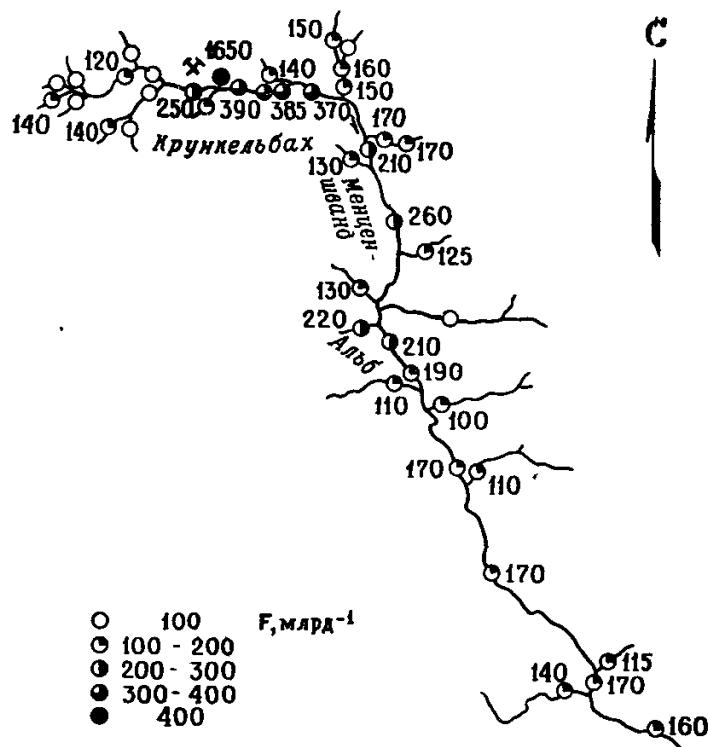
ФИГ. 13. Распределение фтора в водах ручьев в районе Готтесере, серия жил Урберг, Шварцвальд, ФРГ.



ФИГ. 14. Распределение фтора в водах ручьев в районе барито-флюоритового рудника Клара, Вольфах, Шварцвальд, ФРГ.

Распределение фтора в водах, дренирующих минерализованную зону, показывает высокие аномальные значения, от 350 млрд^{-1} до 1600 млрд^{-1} . Фоновые уровни составляют $70-120 \text{ млрд}^{-1}$.

В заключение следует отметить, что определение содержания фтора в водных потоках может оказать большую помощь при дальней-



ФИГ. 15. Распределение фтора в водах ручьев в районе уранового рудника Менценшванд, близ Санкт-Блазиена, Шварцвальд, ФРГ.

шей рекогносцировочной съемке на флюоритовых и флюоритоносных баритовых и урановых месторождениях Шварцвальда.

РАЙОН БЕРХА, ИСПАНИЯ

Галенит-флюоритовое месторождение «Концессия 18 декабря» расположено в 30 км к востоку от города Берха, в провинции Альмерия (южная Испания). Район характеризуется горизонтально залегающими триасовыми доломитами и песчаниками.

Жильная минерализация имеет широкое региональное распространение; характерной особенностью является ее приуроченность к доломитам. Рудные тела стратиформного типа — неправильные и линзообразные образования в пределах одной формации. Пластовые флюоритовые месторождения отличаются ритмичной полосчатостью флюорита и доломита. Кроме флюорита, основным рудным минералом этих отложений является галенит. Киноварь встречается лишь местами и в небольших количествах.

Целью геохимических исследований был сбор данных о распределении ртути, свинца и цинка в почвах тех районов, в которых минерализация известна на глубине 50—200 м.

Наличие древних выработок и отвалов не позволяет получить представительные геохимические данные на участках выхода минерализованного горизонта на поверхность.

На участке севернее шахты «Лупион-Нуэво» отбирались пробы почв по профилю, проходящему с востока на запад, где рудная минерализация обнаружена на глубине 50 м (пробы брались на глубине 5—10 см). В верхнем горизонте, непосредственно залегающем на карбонатных породах, присутствуют скопления органического вещества.

Геохимические данные представлены в таблице I, включающей данные по участку, расположенному западнее шахты, где рудная минерализация встречается на глубине около 200 м. Очевидно, что очень высокое содержание ртути в почвах (33—117 млн⁻¹) отражает наличие рудной минерализации на глубине около 50 м. Свинец и цинк также дают здесь аномалии в почвах. Эти данные могут быть использованы для направления дальнейших исследований в районе Берха.

Таблица I

Содержание ртути, свинца, цинка и меди в почвах над флюорит-галенитовыми рудными телами

Элемент	Содержание, млн ⁻¹	
	Руда на глубине 50 м	Руда на глубине 200 м
Ртуть	33—117	0,45—2,04
Свинец	8900—29 900	720—2550
Цинк	1670—4800	175—500
Медь	45—90	25—35

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Friedrich G. H., Kulms M., Eine Methode zur Bestimmung geringer Konzentrationen von Quecksilber in Gesteinen und Böden und ihre Anwendung bei der geochemischen Exploration von Erzlagerstätten, *Erzmetall*, 22, 74—84, 214—218, 1969.
2. Kulick J., Geologische Aufnahme des Kulmgebietes zwischen Medebach (Westfalen) und Ederbringhausen (Nordhessen), *Diplomarbeit Göttingen*, 1957.
3. Pilger A., Weisser D., Die Barytgänge der Grube Dreislar im östlichen Sauerland, *Erzmetall*, 18, 327—334, 1965.
4. Preuss E., Ziehr H., Zur Verbreitung des Quecksilbers in ostbayrischen Flusspatlagerstätten, *Geol. Rundschau*, 55, 400—413, 1966.
5. Schoell M., Kartierung und geochemisch-paragenetische Untersuchung der Barytgänge der Grube Dreislar/Ostliches Sauerland, *Diplomarbeit Clausthal*, 1966.

ВЛИЯНИЕ ПРИРОДНЫХ УСЛОВИЙ НА ВТОРИЧНОЕ РАССЕЙНИЕ МОЛИБДЕНА И МЕДИ В ЗАПАДНОЙ КАНАДЕ

Р. Ф. Хорснейл

«Амакс-эксplorейшн»,
Ванкувер, Британская
Колумбия

И. Л. Эллиот

«Фалконбридж-
Никель-майнс», Ванкувер,
Британская Колумбия

ВВЕДЕНИЕ

Задача этой статьи состояла в описании и обсуждении некоторых трудностей применения геохимических методов поисков, которые определяются влиянием природных условий. Примеры взяты главным образом из опыта работы авторов в Британской Колумбии.

В общих чертах рассмотрены особенности влияния основных факторов внешней среды, таких, как количество осадков, характер рельефа и типы почв, на циклы вторичного рассеяния микроэлементов, главным образом молибдена и меди. В итоге обсуждается значение полученных данных для практики поисков рудных месторождений.

Описание фактического материала приводит для нескольких типов участков. Особое значение придается а) накоплению разлагаю-

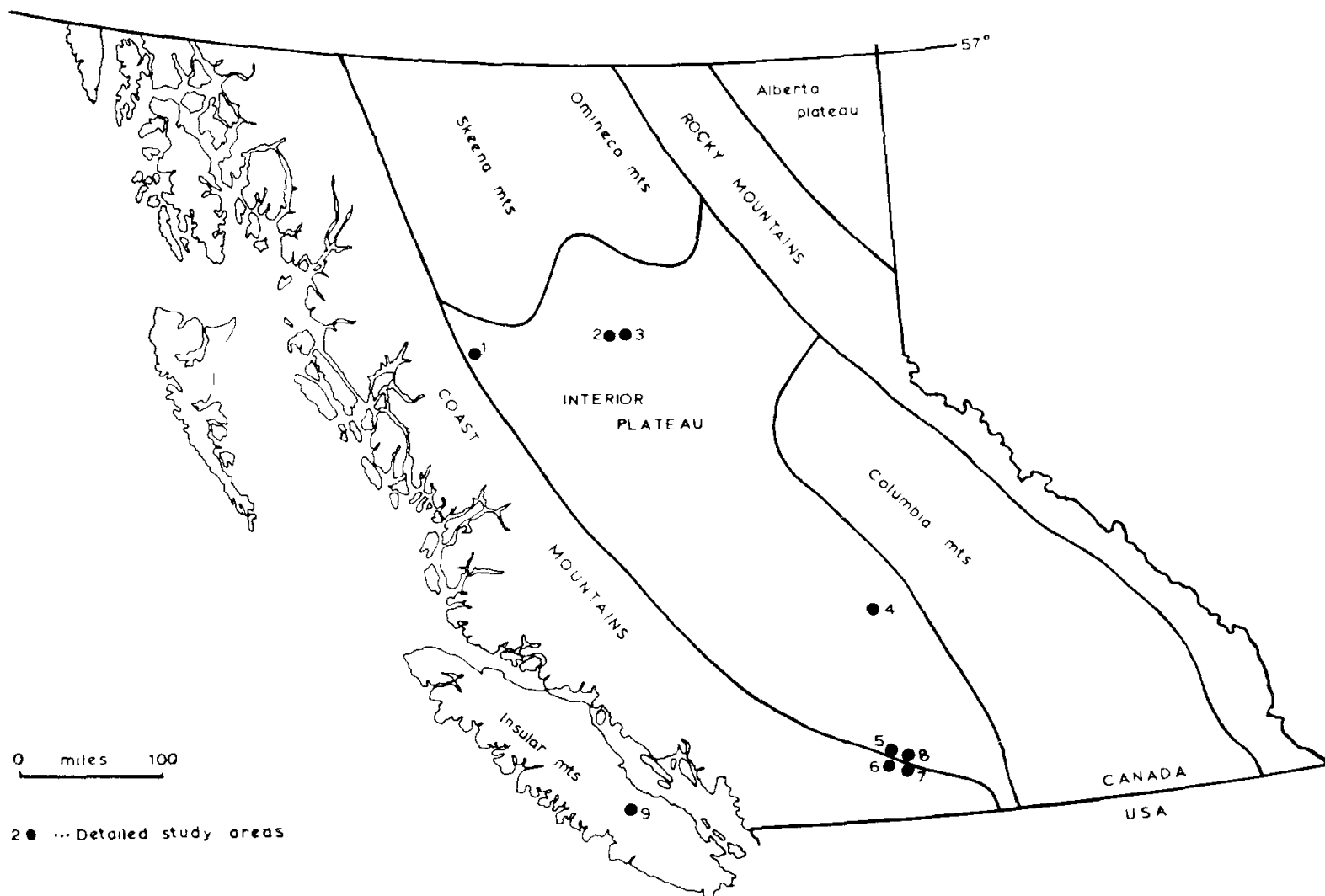
щихся растительных остатков в понижениях с плохим стоком, б) осаждению гидроокислов железа и окислов марганца в поверхностных водотоках и подпочвенном слое и в) зонам осаждения извести в рыхлых отложениях.

ИЗУЧЕННЫЕ ТИПЫ ПРИРОДНЫХ УСЛОВИЙ

Рассматриваемая площадь включает в себя центральную и южную части Британской Колумбии, в пределах которых наблюдается большое разнообразие климатических условий, рельефа и типов почв (фиг. 1).

Главные типы природных условий:

1. *Западное побережье.* Этот район (особенно остров Ванкувер) характеризуется большим количеством осадков (более 2000 мм/год), сред-



ФИГ. 1. Главные физико-географические районы.

ним по пересеченности рельефом и широким распространением кислых подзолистых почв.

2. *Центральная часть.* Рельеф большей частью сглаженный, количество осадков среднее (625—1250 мм/год). Почвы представлены главным образом буроземами, но глееобразование распространено широко там, где дренаж затруднен.

3. *Юго-восточная часть.* Рельеф средний или сглаженный при малом количестве осадков (меньше 625 мм/год). На большей части площади почвы слабо выщелочены и широко развиты известковистые отложения.

Для каждого из описанных главных типов среды было проведено детальное изучение вторичных ореолов рассеяния меди и молибдена. Порядок изложения фактического материала следующий.

1. Заболоченные площади, перекрытые отложениями, богатыми органическим веществом:

- участки развития медной минерализации;
- то же с сопутствующей молибденитовой минерализацией.

2. Площади с широким развитием осаждения гидроокислов железа и марганца в поверхностных водотоках.

3. Роль органического вещества и гидроокислов железа в распределении микроэлементов в почвенном профиле.

4. Роль известковистых отложений в почвенном профиле и перекрывающих месторождения рыхлых породах.

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ

Методика. В этой работе большая часть данных по микроэлементам получена для проб, просушенных и просеянных до фракции 30 меш. Вскрытие материала производилось в горячей смеси хлорной и азотной кислот (85 : 15); последующие определения Mo и Ni сделаны на атомно-абсорбционном спектрофотометре Перкин — Эльмер 290 В. Точность достигала $\pm 25\%$ с уровнем вероятности 95%.

Заболоченные площади, перекрытые отложениями, богатыми органическим веществом. Исследования проводились на площадях со средним количеством осадков, местами перекрытых болотными отложениями. Два участка с медной минерализацией в коренных породах расположены на юге Британской Колумбии, а два других с молибденитовой минерализацией находятся в центре Британской Колумбии.

Участки с медной минерализацией в коренных породах. Два участка, где медные минералы (преимущественно халькопирит) ассоциируют с пиритом (фиг. 1, участки 5 и 6), составляют

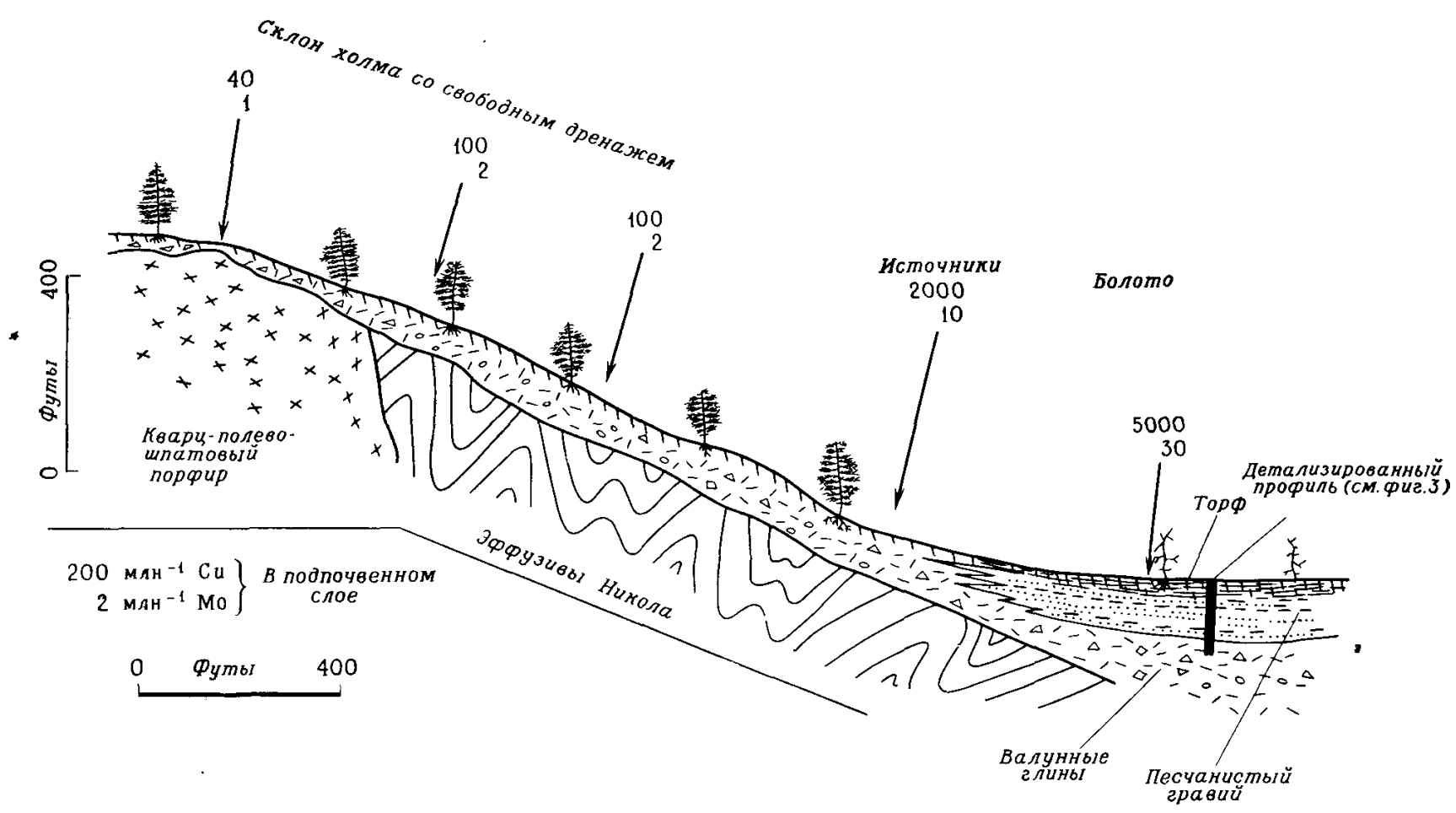
по площади около 13 км². Они расположены вблизи контакта между гранодиоритами Игл и группой вулканических пород Никола. Последние представлены серией лавовых потоков и пирокластов среднего состава с маломощными прослоями осадочных пород. Они претерпели региональный метаморфизм в условиях зеленосланцевой фации.

Для обоих участков характерны мелкие заболоченные водоемы глубиной 1,5—3 м, обрамленные гумусовыми глеевыми почвами. Крутые склоны окружающих холмов покрыты хорошо дренированными подзолами или кислыми буроземами, развитыми на валунных глинах. Близповерхностные грунтовые воды движутся в основном вниз по склонам в заболоченные бассейны. В результате широкого развития процесса окисления пирита, особенно в эффузивах группы Никола, грунтовые воды, вероятно, имеют умеренно кислую реакцию.

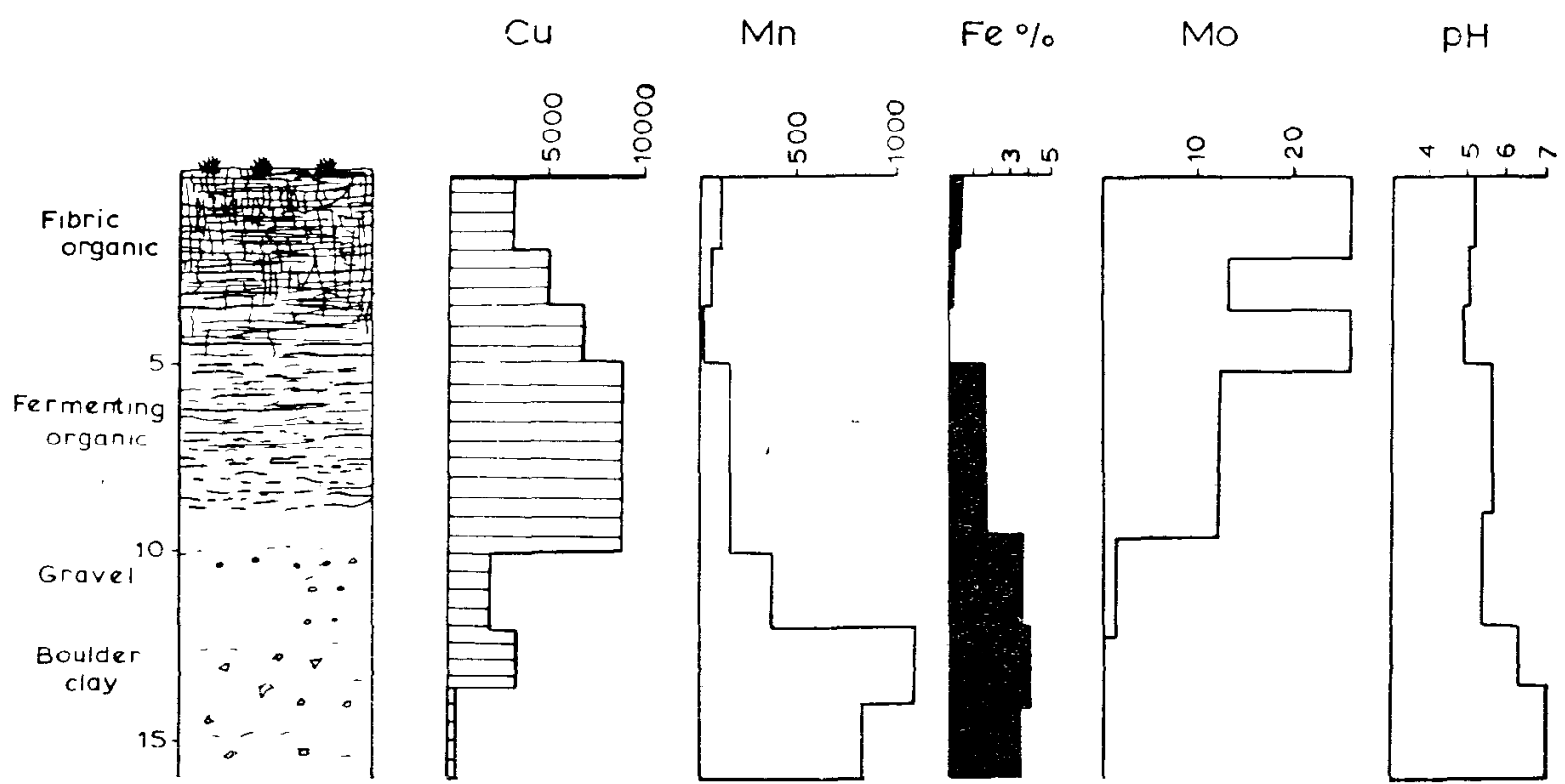
Наиболее важной особенностью распределения микроэлементов является то, что богатые органическим веществом болотные отложения заметно обогащены медью по сравнению с прилегающими к ним хорошо дренированными почвами и пестрыми глинами, подстилающими болота (фиг. 2 и 3). Молибден также имеет некоторую тенденцию к накоплению в богатых органическими остатками отложениях, а в поведении Fe, Mn, Co, Ni и Zn наблюдается противоположная направленность.

Наиболее яркий пример накопления меди в профиле болотных отложений показан на фиг. 3. Здесь в верхнем слое волокнистого торфа мощностью 1,5 м встречаются концентрации меди порядка 3000—8000 млн⁻¹. Максимального уровня содержание меди (8 000—10 000 млн⁻¹) достигает в черных, богатых органическим веществом илах на глубине 1,5—3 м от поверхности. В целом по меньшей мере 70—90% этой меди присутствует в форме экстрагируемой 2,5%-раствором NaEDTA при взбалтывании на холоду. Подстилающий песчаный гравий на глубине от 3 до 4 м содержит 1000—3000 млн⁻¹ Cu, тогда как в ледниковых валунных глинах, встречающихся глубже 4,5 м, концентрация меди падает до 250 млн⁻¹. Значения pH возрастают от 5,0—5,5 в богатом органическими остатками горизонте до 7,0 в тилле на глубине 4,5 м. Концентрации Fe, Mn и Co низки в богатых медью горизонтах с органическим веществом, но заметно возрастают в гравии и тилле, подстилающих водоем. Наибольший диапазон колебаний (от 100 млн⁻¹ до 1000 млн⁻¹) характерен для марганца.

В полученных данных заслуживают внимания еще две тенденции. Марганец концентри-



ФИГ. 2. Молибден и медь в подпочвенном горизонте (участки 5 и 6).



ФИГ. 3. Вариации значений pH и содержаний Cu, Mn, Fe и Mo в профиле по болоту (участки 5 и 6, см. также фиг. 2).

руется в лесной подстилке, которая образует верхние 5 см в профилях кислых буроземов под хвойным покровом. Типичными для подпочвенного слоя могут быть величины порядка $200 \text{ млн}^{-1} \text{ Мп}$, тогда как в верхнем растительном слое концентрация Мп обычно достигает 1000 млн^{-1} . Для молибдена проявляется другая зависимость. Он обогащает пятнистые, богатые закисью железа илы в основании склонов холмов. В почвах и подстилающих илах содержание железа колеблется обычно от 2 до 4%, а концентрация Мо меньше или равна 1 млн^{-1} . Однако в донной части ила мощностью 15—30 см, для которого характерна ржавая пятнистость, содержание железа поднимается выше 9%, а концентрация Мо достигает $10\text{--}30 \text{ млн}^{-1}$.

В литературе приведено несколько примеров обогащения медью болотных отложений. Лавринг [14] сообщает о болотах, в которых медь присутствует в виде самородного металла, а Фрейзер [4] описывает концентрацию меди, находящейся в торфе в форме металлоорганических комплексов, которая превышает 10%. Но для двух заболоченных участков, описанных в данной работе, не найдено доказательств существования меди в виде самородного металла или в виде рассеянных окислов или сульфидов.

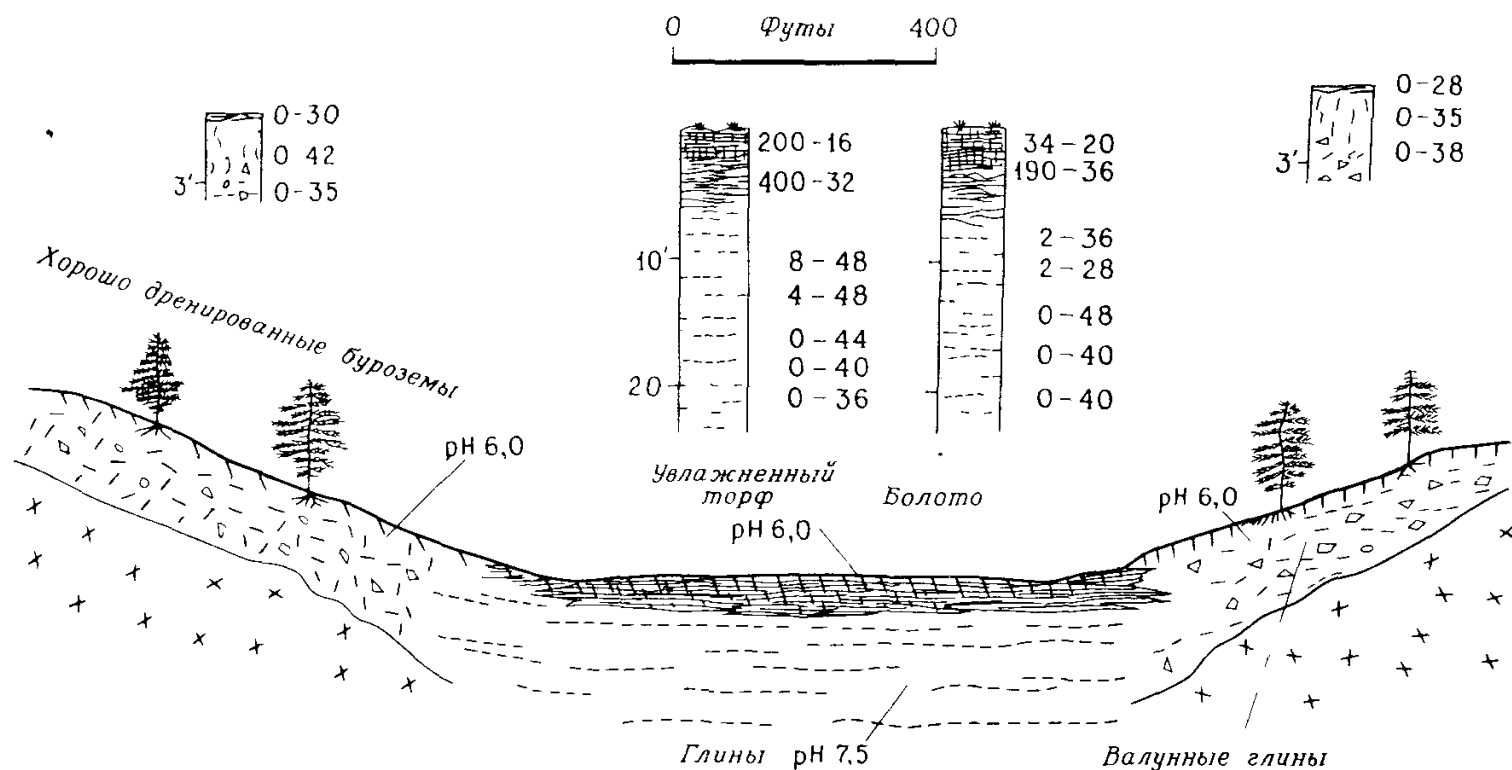
Участки вблизи молибденитовых рудопоявлений. Эти данные относятся к двум небольшим участкам, расположенным примерно в 8 км к северу от молибденового рудника Эндако, в центральной части Британской Колумбии (фиг. 1, участки 2 и 3). В непосредственной

близости от каждого участка сульфидная минерализация неизвестна. Предполагают, что подстилающими породами служат кварцевые монциты одной из фаз интрузии Топли.

Главной топографической особенностью обоих участков являются плоские депрессии, вероятно представляющие собой впадины на месте бывших озер (фиг. 4). В настоящее время эти понижения заняты болотами, в которых пропитанные водой глины с небольшим количеством песчанистого гравия перекрыты слоем увлажненного торфа мощностью 60—150 см. Как полагают, движение грунтовых вод в болотах, особенно летом, было направлено преимущественно вверх. Оно осуществлялось путем капиллярной диффузии в результате испарения с поверхности.

Площади, окружающие болота, имеют умеренно пересеченный рельеф, и их почвы представлены главным образом хорошо дренированными буроземами, сформированными из валунных глин. Богатые органическим веществом болотные отложения и окаймляющие их буроземы обладают нейтральной или слабо кислой реакцией, тогда как глины, формирующие более глубокие горизонты болот, являются слабо щелочными.

Воды поверхностных водотоков обоих участков несут молибден в количестве до $10\text{--}50 \text{ млрд}^{-1}$; в региональном плане это слабые аномалии (фон 4 млрд^{-1}). В обоих случаях источниками аномалий являются заболоченные впадины. В результате систематического опробования почв на площадях, окружающих оба



ФИГ. 4. Молибден и медь в профиле по болоту и в соседних хорошо дренированных почвах (участки 2 и 3). Цифрами показано содержание Си и Мо (в млн^{-1}) во фракции —30 меш.

болота, не удалось обнаружить какие-либо крупные аномалии молибдена. Содержания молибдена почти во всех почвах находятся на уровне предела чувствительности (1 млн^{-1}) или ниже его. В профилях по двум болотам, пройденным до глубины 7,5 м, наблюдаются более высокие концентрации молибдена в близповерхностных, богатых органикой отложениях по сравнению как с более глубоко залегающими глинами, так и окружающими буроземами. Повышение содержания Mo не сопровождается, однако, возрастанием концентраций Cu, Mn, Fe, Co, Ni, Zn и Cr.

В наиболее типичном профиле содержание молибдена в пропитанных водой глинах ниже 2 млн^{-1} , а концентрация меди — около 40 млн^{-1} (фиг. 4). В перекрывающих органогенных отложениях, pH которых примерно на единицу ниже, чем в глинах, содержания молибдена, составляющие $20\text{—}50 \text{ млн}^{-1}$, обычны, а максимальные значения достигают $500\text{—}800 \text{ млн}^{-1}$. Для меди характерна обратная тенденция: ее среднее содержание в богатых органическим веществом отложениях равно всего 25 млн^{-1} . Подобные понижения концентраций в богатом органикой горизонте характерны также для Mn, Fe, Co, Ni и Zn, причем наиболее резко они проявлены для Mn (от 400 млн^{-1} до 50 млн^{-1}). По неполным данным можно допустить, что содержание вольфрама выше в слое перегноя (20 млн^{-1}), чем в подстилающих глинах (2 млн^{-1}). Для объяснения способа накопления молибдена в богатых органическим веществом отложениях собранной информации недостаточно.

Салми [19] описывает крупные аномалии молибдена в близповерхностных горизонтах финских торфяных болот, которые образовались на озерных глинах, перекрывающих месторождение молибденита. Молибден, как полагают в этом случае, был транспортирован через глину посредством восходящей диффузии грунтовых вод.

Накопление гидроокислов железа и марганца путем осаждения в поверхностных водотоках. Одним из результатов действия факторов внешней среды, который привлекает внимание при геохимических поисках, является осаждение гидроокислов железа и марганца в поверхностных водотоках и связанное с ним соосаждение тяжелых металлов. Этот процесс иногда приводит к образованию ложных аномалий. Осадки гидроокислов железа и марганца широко распространены в реках и озерах северных широт [1, 2, 9, 13, 20]. Распределение таких осадков в большинстве своем не зависит от геологического строения участка, но часто коррелируется с площадями развития кислых

почв, содержащих разлагающееся органическое вещество. Коренные породы обычно перекрыты плейстоценовыми гляциальными наносами, которые содержат большое количество относительно свежих обломков различных минералов.

Осадки гидроокислов железа и марганца обогащены целым набором микроэлементов, включающим Ag, As, Ba, Be, Co, Cu, Mo, Ni, Pb, Sn и Zn. Марганцево-железистые отложения обычно имеют более высокие содержания микроэлементов, чем чисто железистые типы осадков, хотя As и Mo, как сообщалось [10], были первоначально ассоциированы с железом.

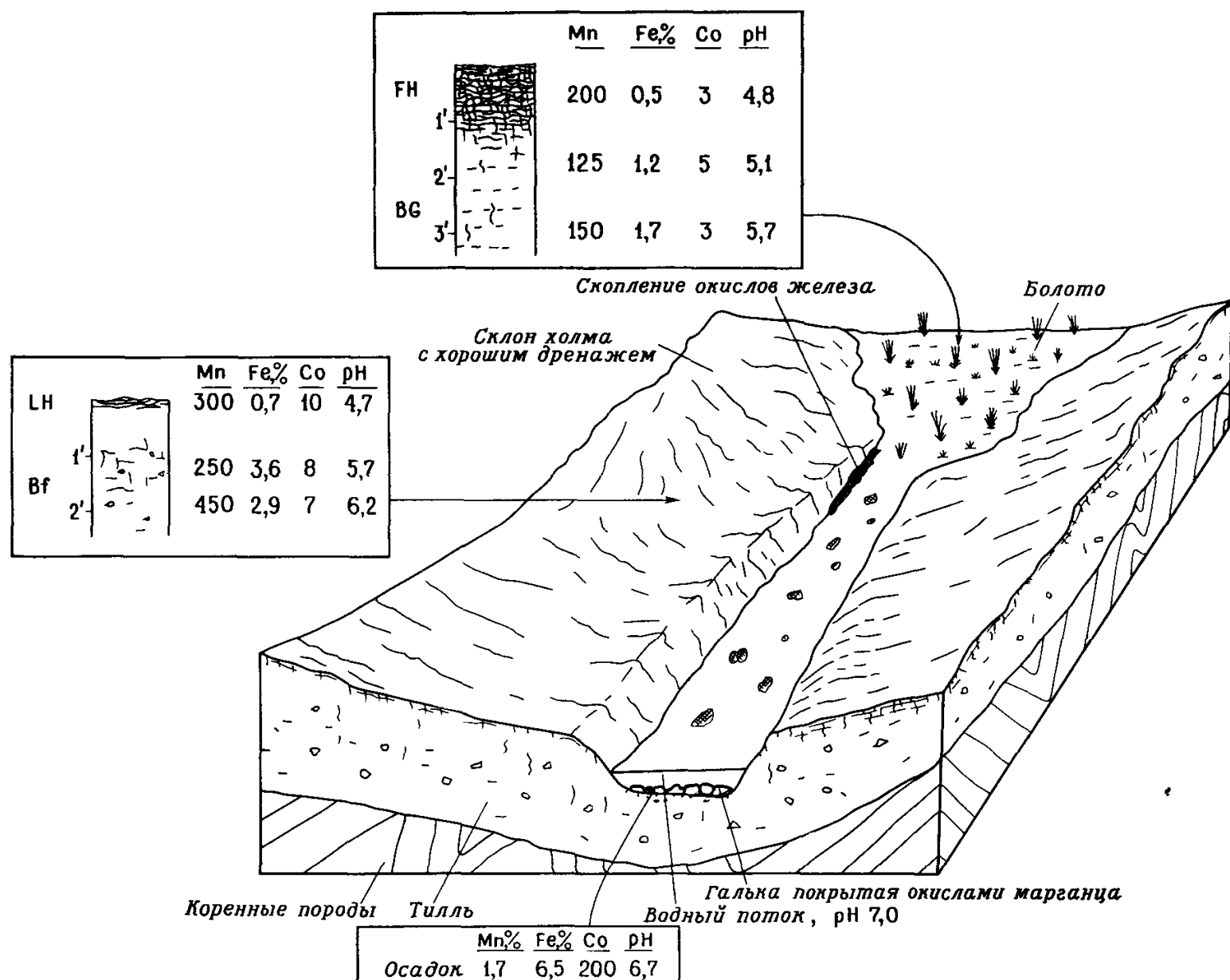
Отложения гидроокислов железа и марганца наблюдались авторами во многих районах Британской Колумбии, особенно в западных областях, где количество осадков превышает 1250 мм/год и преобладают подкисленные подзолистые почвы. В этой работе приведены данные по небольшому участку вблизи Порт-Альберни на острове Ванкувер (фиг. 1, участок 9). Впервые внимание к этой площади было привлечено благодаря накоплению молибдена в донных осадках до уровня выше 20 млн^{-1} . Коренные породы представлены эффузивами среднего состава. Склоны холмов покрыты хорошо дренированными подзолистыми почвами, тогда как насыщенные водой глеевые почвы обрамляют поверхностные водотоки и водоемы во впадинах.

Систематическое опробование подпочвенного слоя на территории развития аномальных донных осадков показало, что некоторые элементы, такие, как Fe, Mn, Mo и Cu, обогащают осадки поверхностных водотоков по сравнению с почвами. Особенно контрастен марганец, средний уровень содержания которого в донных осадках (1900 млн^{-1}) почти в шесть раз выше, чем в почвах (330 млн^{-1}). Почвы имеют более кислую реакцию (среднее значение $\text{pH} = 5,6$), чем воды ручьев (среднее значение $\text{pH} = 6,8$).

На некоторых площадях активное осаждение гидроокислов железа отчетливо проявляется в речных отмелях. Осадок фиксируется в виде ржавого цемента, скрепляющего коллювиальный материал отмелей и формирующего шельф чуть ниже летнего уровня воды.

В полузастойных мелких водоемах обычны пятна неконсолидированных илов, богатых гидроокислами железа. Объединенные пробы материала отмелей, сцементированного окислами железа, заметно обогащены Mn (от 0,4 до 1,3%) и Fe (от 9,4 до 13,0%) по сравнению с почвами междуречий, а также имеют повышенные содержания Mo ($6\text{—}18 \text{ млн}^{-1}$), Cu ($200\text{—}300 \text{ млн}^{-1}$) и Co ($100\text{—}150 \text{ млн}^{-1}$).

Осадки гидроокислов марганца встречаются



ФИГ. 5. Осаждение окислов железа и марганца в поверхностных водотоках (участок 9)

в той части площади, где из насыщенных водой заболоченных впадин вытекают мелкие ручьи (фиг. 5). Почти все гальки в русле ручья покрыты слоем черных окислов марганца. Во многих случаях нижние поверхности галек, прилегающие к дну водотоков, окрашены ржавыми окислами железа. Результаты опробования почвенных профилей в болотах и на соседних склонах холмов с хорошим дренажем показывают, что содержание марганца и кобальта заметно повышено в донных осадках по сравнению с ассоциирующими почвами (фиг. 5). В осадках уровни содержаний марганца колеблются от 0,7 до 4,0%, а Co — от 130 до 500 млн⁻¹; в почвах же соответствующие колебания составляют лишь 120—500 млн⁻¹ и 2—38 млн⁻¹. Однако Cu, Mo, Zn и Fe не концентрируются в осадках поверхностных водотоков.

Роль окислов железа и органического вещества в почвенных профилях. В этом разделе представлены данные, которые могут

служить примером влияния накопления окислов железа в подзолистых подпочвах, а также аккумуляции органического вещества в глее верхнего почвенного слоя на распределение микроэлементов (особенно молибдена и меди) в почвенном профиле. Рассматриваемый участок расположен примерно в 80 км к югу от Хьюстона в центре Британской Колумбии (фиг. 1, участок 1). Коренные породы представлены штоком кварцевых порфиров, секущим эффузивы среднего состава [6, 8]. В породах штока широко развит молибденит в сопровождении пирита; пирит встречается и во вмещающих породах.

Описываемый участок имеет средний уклон около 15°, но поверхность осложнена несколькими неровностями. Рыхлые отложения состоят из тонкого поверхностного слоя валунной глины. Встречаются резкие переходы от подзолов к глеевым почвам, контролируемые расположением мелких впадин (фиг. 6). Преобладающее

Таблица I

Сравнение участков со слабым и хорошим дренажем почв

	Глубина, см	Mo	Cu	EDTA _x Cu ¹	Amm _x Cu ²	As	Co	Cr	Ni	Pb	Zn	Mn	Fe, %
Впадины со слабым просачиванием													
АН	2,5	72	440	224	132	5	20	20	24	340	1920	1900	2,9
Bg	30	15	58	20	20	6	12	22	24	25	1400	300	2,5
Подзолы со свободным дренажем													
LN	2,5	12	14	8	4	5	8	10	12	15	448	580	1,6
Ae	5	15	10	6	4	4	6	18	8	20	60	120	1,6
Bf	23	18	24	4	2	8	14	18	22	25	216	240	4,1
Bm	37,5	18	28	4	2	6	18	14	28	30	248	220	3,5

1 Вытяжка раствором EDTA

2 Вытяжка раствором лимоннокислого аммония

Таблица II

Аналитические данные по болоту, заросшему ольхой

Горизонты почвенного профиля	Глубина, см	Mo	Cu	EDTA _x Cu	Amm _x Cu	As	Co	Cr	Ni	Pb	Zn	Mn	Fe, %
Богатый органикой	8	174	1520	880	700	6	120	10	16	50	392	5200	2,9
Желто-коричневый	23	39	660	128	148	10	32	10	40	42	400	720	3,0
Крапчатый серо-коричневый	45	15	460	52	84	6	16	10	32	20	188	420	2,9
Ржавая прослойка	60	66	352	92	96	15	18	8	28	20	172	1900	4,0
Голубовато-серые глины	90	9	96	36	38	10	20	6	32	20	104	380	3,2

Таблица III

Изменение содержания элементов по профилю, обусловленное влиянием извести

Глубина, см	Mo	Cu	EDTA _x Cu	Amm _x Cu	Co	Ni	Pb	Zn	Mn	Fe, %
8	1	72	20	4	14	12	15	92	680	2,4
23	1	116	22	16	11	8	20	60	540	2,4
45	3	76	22	16	9	12	15	44	440	1,9
60	1	80	22	16	10	12	15	48	480	1,9
90	1	44	8	4	10	12	15	48	420	2,0
150	1	880	260	152	16	12	20	80	720	2,4

движение грунтовых вод направлено вдоль склона вниз в заросшее ольхой болото у подножия холма.

Проведено сравнение двух участков с хорошим и слабым дренажем (длина каждого при-

близительно 30 м). В местах просачивания грунтовых вод некоторые элементы, такие, как Mo, Cu, Pb, Zn и Mn, заметно концентрируются в богатом органическим веществом поверхностном слое относительно глеевого подпочвенного слоя. В то же время в соседних, хорошо дренированных подзолах единственным элементом, присутствующим в аномальных для региона количествах, является молибден, а в растительном слое накапливается только марганец. Эти тенденции отражены в табл. I — III. Цифры приведены в млн⁻¹, кроме тех, для которых единицы измерения обозначены в таблицах I — III.

В болоте, заросшем ольхой, у подножия склона песчаные глины перекрыты слоем увлажненного перегноя толщиной 30 см. Мощное глееобразование и повторное окисление приводят к широкому развитию ржавой пятнистости. Самым нижним горизонтом являются голубовато-серые, явно восстановленные глины, поверхность которых отмечена почти горизон-

тальной ржавой прослойкой. Эта прослойка, возможно, сложена гидроокислами железа, осажденными из грунтовых вод. В богатом органическим веществом поверхностном слое наблюдаются явно аномальные уровни содержаний Mo, Cu, Co и Mn, в меньшей степени Pb и Zn, как по сравнению с соседними участками, так и с нижележащими горизонтами этого профиля. Ржавая прослойка обогащена Mo, As и Mn. Аналитические данные приведены в табл. II.

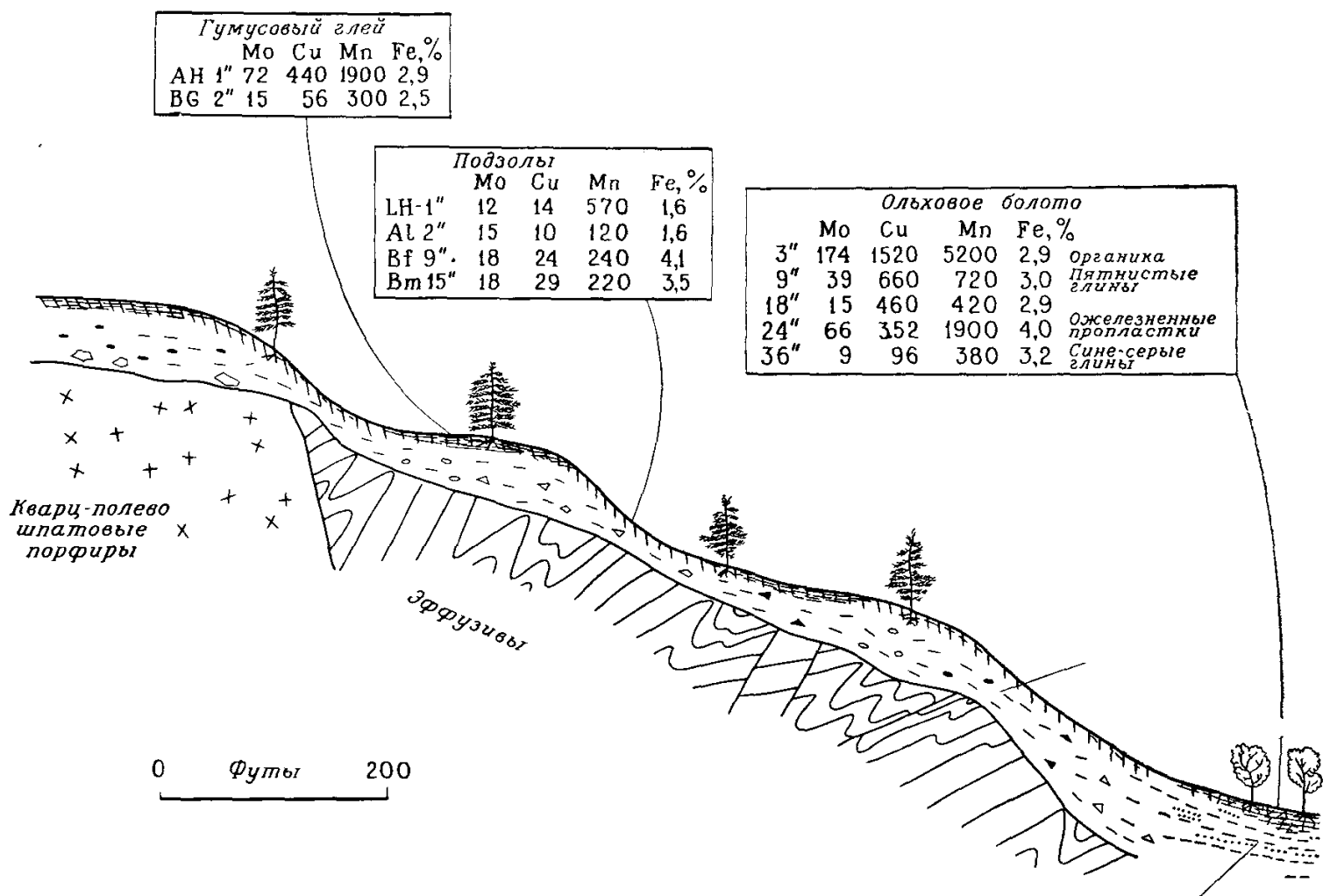
Известковистые отложения в почвах. Отложения извести в почвенных профилях и делювии конусов выноса широко распространены в «сухом поясе» юго-восточной части Британской Колумбии, где среднее количество осадков обычно менее 625 мм/год. Известковистые отложения являются фактором, препятствующим рассеянию меди.

Влияние извести на распределение микроэлементов изучено на двух участках вблизи Принстона в южной части Британской Колумбии. Один участок (фиг. 1, участок 7) расположен на слабо волнистой вершине холма, где содержащиеся халькопирит вулканические породы группы Никола перекрыты серым тиллем. Известковистые осадки обычно наблюдаются на

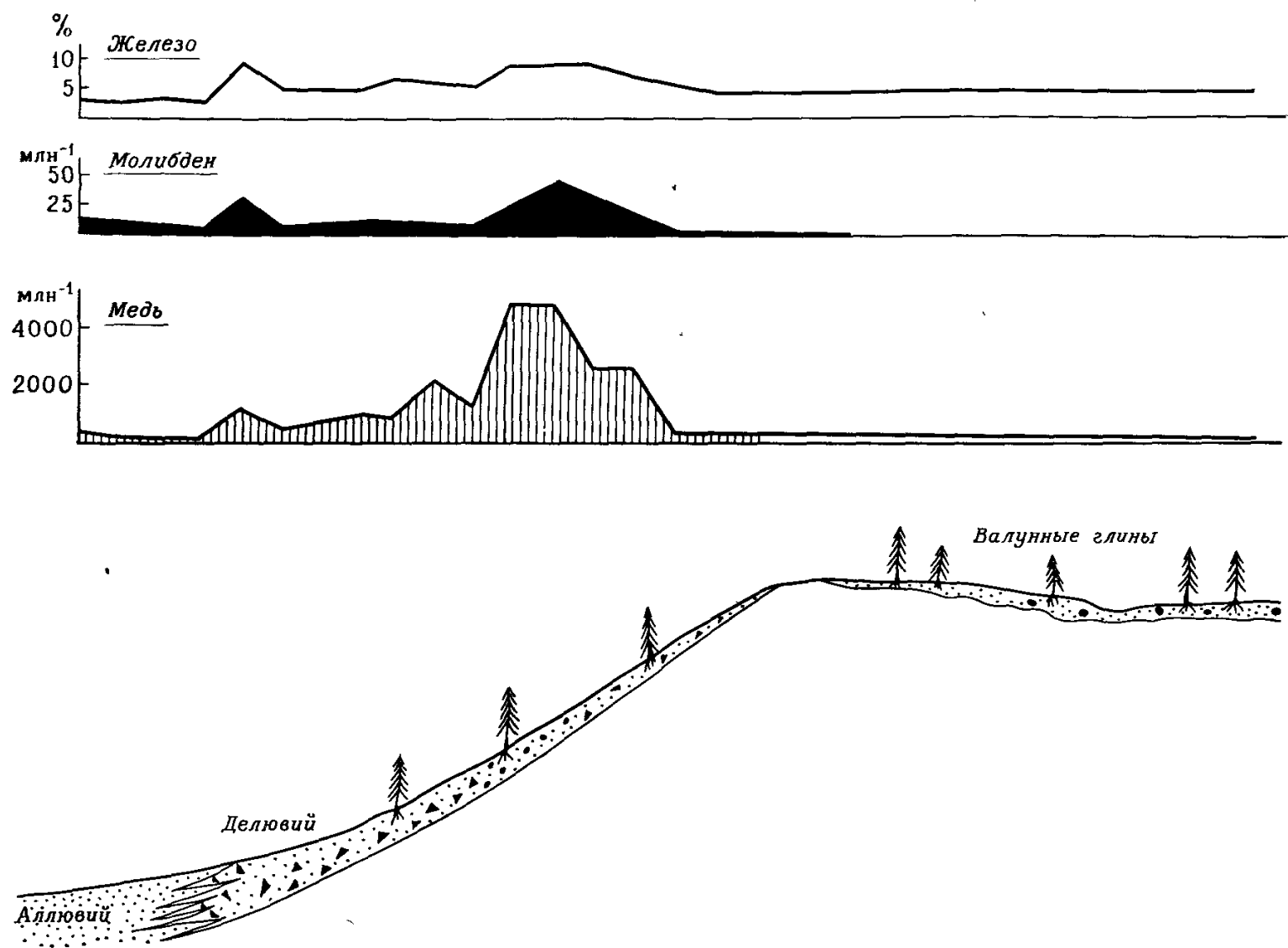
глубине от 6 до 9 м от поверхности. Содержания меди в приповерхностном слое почвы составляют 70—120 млн⁻¹, а тилль, перекрывающий минерализованные коренные породы, содержит 880 млн⁻¹ Cu. Изменения содержаний меди по профилю приведены в табл. III.

Второй изученный участок (фиг. 1, участок 8) вблизи Принстона характеризуется развитием щелочных, богатых карбонатами почв, образованных из каменистого коллювия, который возник за счет подстилающих эффузивов группы Никола. Широко распространенный пирит ассоциирует в них с убогой халькопиритовой минерализацией. Главная топографическая особенность участка — глубоко врезающиеся долины с крутыми склонами. На более плоских вершинах холмов почвы представлены буроземами. Однако почвы на крутых склонах находятся на начальных стадиях развития и коренные породы прикрыты неполностью стабилизированным делювием, содержащим известь.

Систематическое опробование подпочвенного горизонта проведено на большой территории как по холмистой возвышенности, так и по крутым склонам долин. Содержания меди на



ФИГ. 6. Содержание Mo, Cu, Mn и Fe в почвенных профилях и соотношение их с ландшафтом (участок 1). Цифрами показано содержание элементов (в млн⁻¹) во фракции —30 меш.



ФИГ. 7. Содержание меди, молибдена и железа в подпочвенном горизонте (участок 8).

вершинах холмов обычно колеблются от 30 млн^{-1} до 70 млн^{-1} , а концентрации молибдена постоянно ниже 2 млн^{-1} . Однако в тонких фракциях делювия склонов долин встречаются крупные аномалии (фиг. 7), где содержания меди, изменяющиеся от 3000 млн^{-1} до 7000 млн^{-1} , ассоциируют с аномальными концентрациями молибдена от 15 млн^{-1} до 40 млн^{-1} . Пикам меди в аномальных участках сопутствуют также повышенные по сравнению с фоном (менее 1 млн^{-1}) содержания Ag , составляющие $5\text{--}10 \text{ млн}^{-1}$, к тому же богатые медью пробы обогащены Fe до $5\text{--}8\%$, против обычных содержаний ниже 4% в других местах. Наблюдаются также несколько повышенные содержания Pb , Co , Ni . В отличие от других изученных элементов концентрации марганца и цинка не увеличиваются параллельно с возрастанием содержаний меди и молибдена. Уровень содержаний меди и молибдена в почвах обычно по меньшей мере в три раза выше концентраций в коренных породах, непосредственно их подстилающих.

Большая часть меди экстрагируется из проб разбавленным раствором лимоннокислого ам-

мония, а также разбавленной соляной кислотой. Например, если горячей концентрированной азотной кислотой из пробы экстрагируется $2000 \text{ млн}^{-1} \text{ Cu}$, то уже на холоду двунормальной соляной кислотой может быть извлечено 1750 млн^{-1} .

Похожий ландшафт характерен и для третьего изученного участка (фиг. 1, участок 4), расположенного на реке Рейфилд. В рельефе местности холмистое плато преобладает над глубоко врезанными долинами. Почвы представлены главным образом буроземами, развитыми на флювиогляциальном песчаном гравии. Почвенный горизонт отчетливо не выделяется вследствие неполного выщелачивания. Накопление извести обычно происходит в подпочвенном слое, и значения pH колеблются от $7,5$ до $9,0$. Склоны долин часто нестабилизированы и покрыты делювием с высоким содержанием извести. В понижениях плато встречаются многочисленные водоемы, обычно не имеющие поверхностного стока. Так как водоемы не обрамлены отложениями выпаривания, приходится предполагать наличие постоянного просачивания сквозь дно.

Коренные породы представлены сиенитами и гранодиоритами. В них широко распространена слабая медная минерализация ($\cong 0,1\%$), в основном представленная борнитом и халькопиритом. Пирита, связанного с этой минерализацией, мало или он отсутствует.

Рекогносцировочное опробование почв вскрыло крупные аномалии меди. Они имеют прямое отношение к рельефу, так как почти полностью ограничены крутыми, покрытыми делювием склонами главной долины.

Контрастность аномалий меди повышается, если рассматривать легко экстрагируемую часть металла. С применением разбавленной EDTA или раствора лимоннокислого аммония получены содержания $300-1500 \text{ млн}^{-1} \text{ Cu}$ в аномалиях ($20-35\%$ общего содержания Cu) по сравнению со значениями фона порядка $2-6 \text{ млн}^{-1}$. Пробы, наиболее богатые медью, одновременно несколько обогащены Pb, Zn и Mn. Эта тенденция, однако, не распространяется на Fe, Ni, Co, Cr, Mo, Ag и As.

ОБСУЖДЕНИЕ ГЕОГРАФИЧЕСКИХ И ГЕОХИМИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Предполагается, что приведенные данные могут служить примером влияния на вторичное рассеяние:

- 1) ионного потенциала;
- 2) Eh и pH водной среды, в которой происходит рассеяние;
- 3) формирования устойчивых комплексов меди и молибдена с органическими соединениями;
- 4) соосаждения тяжелых металлов со свежесоосажденными гидроокислами железа и марганца;
- 5) ограничения подвижности меди в известковистых отложениях.

Важная роль величины ионного потенциала в процессе вторичного рассеяния хорошо известна [15, 16]. Ионный потенциал может рассматриваться как выражение величины положительного заряда на поверхности иона и играет ведущую роль в поведении ионов по отношению к воде. Элементы с низкими ионными потенциалами в процессе выветривания обычно формируют растворимые свободные одно- или двухвалентные катионы. Те элементы, у которых ионные потенциалы имеют промежуточную величину, образуют гидролизаты и обычно не мобильны. Элементы с высоким ионным потенциалом дают комплексные оксианионы и, как и первые, обычно растворимы.

Некоторые из обсуждаемых элементов в процессе рассеяния могут находиться в разной

степени окисления. Железо и марганец, например, могут встречаться в виде растворимых двухвалентных катионов или могут быть окислены до трех- и четырехвалентного состояния с образованием нерастворимых гидролизатов. Молибден, напротив, подвижен в наиболее окисленной из встречающихся в природе форм (шестивалентный в виде MoO_4^{2-}) и становится менее подвижным, когда валентность уменьшается до пяти [7].

Значение Eh и pH играют большую роль в процессе вторичного рассеяния. Некоторые металлы переходят в раствор в форме двухвалентных катионов в условиях умеренно низких значений Eh и pH [5]. Однако, если в процессе вторичного рассеяния величины Eh и pH существенно возрастут, эти ионы будут окисляться и осаждаться в виде гидроокислов. Наиболее типичным примером такого поведения являются железо и марганец.

Резко выраженные вариации значений Eh и pH часто встречаются на участках, где бурные потоки протекают через участки со слабо дренированными почвами и богатыми органикой поверхностными горизонтами. Разложение растительного материала обычно делает грунтовые воды кислыми (pH от 3,0 до 5,0), а их реакцию восстановительной (Eh от 0 до 200 мВ). Такие воды, взаимодействуя с ледниковыми тиллями, способны растворять заметные количества металлов, в том числе Fe, Mn, Ni, Co и Zn. Ниже зоны разложения растительных остатков pH грунтовых вод, как правило, повышается до уровня нейтральных или слабо щелочных значений вследствие гидролиза силикатных минералов. Медь быстро переходит в раствор в кислой среде, но для этого ей необходимы более окислительные условия, чем господствующие в почти анаэробных поверхностных слоях почвы.

Кислые грунтовые воды, несущие растворенные катионы, мигрируют в системе местных поверхностных водотоков. При входе вод в поверхностные водотоки их Eh и pH обычно резко возрастают вследствие аэрации и достигают уровня, достаточного, чтобы вызвать осаждение гидроокислов Fe, а затем Mn. Только что осажденные гидроокислы марганца имеют отрицательный электростатический заряд и поэтому притягивают и накапливают двухвалентные катионы таких элементов, как Co, Ni, Zn. Гидроокислы железа, заряженные положительно, притягивают анионы, и потому с ними накапливаются элементы с высоким ионным потенциалом (такие, как Mo, As). Эта тема подробно рассмотрена Енне [11], который приходит к выводу, что гидроокислы Fe и Mn действуют как «ловушка» для многих тяжелых металлов.

Они образуют тонкие пленки на зернах минералов в почвах и других рыхлых отложениях, и таким образом их адсорбционная способность оказывается значительно больше, чем можно было бы ожидать, исходя только из их весовой доли. Вероятно, многие особенности распределения микроэлементов, наблюдаемые на изученной территории острова Ванкувер, обусловлены действием механизма, описанного выше.

Местные колебания значений Eh и pH являются основными факторами, обусловившими распределение Fe и Mo в почвенных профилях на участке 1. На хорошо дренируемых склонах железо мобилизуется в кислом поверхностном слое почв и переносится сточными грунтовыми водами в нижнюю часть профиля и к подошве склона. Однако повышение pH с глубиной вызывает окисление иона закисного железа и осаждение гидроокиси железа; таким образом формируются красные, обогащенные железом подпочвы с отдельными сгустками болотной руды. Этот процесс широко распространен в северных широтах [13, 18].

Ассоциация повышенных содержаний молибдена с зонами, обогащенными железом, дает возможность предположить соосаждение молибдат-иона с гидроокисью железа и накопление его в почвах со свободным дренажем. Напротив, на ровных участках вследствие слабого дренажа почв происходит разложение растительных остатков с последующим падением величины Eh. В этих условиях железо будет восстанавливаться до двухвалентного состояния и переходить в раствор, освобождая таким образом какую-то часть адсорбированного молибдена. Восстановление присутствующего железа, видимо, обуславливает сероватую окраску плохо дренированных подпочвенных горизонтов. Это заключение подтверждается экспериментами по брожению, проведенными Нджи и Бумфилдом [17]. Они заливали водой почву, содержащую гидроокислы железа с адсорбированным молибденом, и смешивали ее с растительным материалом. В результате разложения растительности происходило падение Eh и pH с последующим освобождением и переходом в раствор значительных количеств железа и молибдена.

В таких условиях накопления марганца в подзолистом подпочвенном слое почти не происходит. Это указывает на то, что марганец, восстановленный однажды до двухвалентного состояния, не попадает больше в окислительные условия, достаточные для его осаждения, и в основной массе удаляется с дренажными водами вниз по склону. Но на отдельных участках наблюдалось накопление марганца в богатом органическим веществом поверхностном слое

как хорошо, так и плохо дренированных почв.

На нескольких изученных участках была отмечена корреляция между высокими содержаниями меди и накоплением разлагающегося органического вещества в почвах. Во всех случаях подкисленные грунтовые воды попадали в заболоченные участки после пересечения площадей, где значение Eh достаточно высокое для окисления сульфидных минералов, в том числе и пирита. Кислотность грунтовых вод в непосредственной близости от окисляющегося пирита резко повышается, что способствует переходу в раствор большого числа металлов, включая Cu, Zn, Ni, Co, Mn, Fe, Mo и As.

При вступлении таких вод в зоны разложения растительных остатков происходит извлечение из раствора меди, в меньшей мере молибдена. Однако другие элементы, такие, как железо и марганец, которые могут находиться в растворе с медью, ведут себя иначе. Предполагается, что на изученных территориях осаждение меди вызвано формированием сложных металлоорганических комплексов [3, 4]. Другие металлы при преобладающих низких значениях Eh и pH проходят через болото в растворах. Таким образом, оказывается, что медь обладает сильным сродством к органическим соединениям, свойством, которое не проявляют Fe, Mn, Co, Ni и Zn, во всяком случае, при умеренно низких значениях pH и Eh.

На других участках замечено накопление молибдена в богатых органикой болотных отложениях, но эта тенденция не проявлена для Cu, Mn, Fe, Co, Ni, Zn и Pb. Типично, что подобная концентрация молибдена происходит на площадях, где пересыщенные водой слабощелочные ледниково-озерные осадки перекрыты тонким слоем торфяников. В щелочных условиях молибден, вероятно, переходит из осадков в раствор, однако значение pH слишком высоко, чтобы произошло заметное растворение Cu, Mn, Fe, Co, Ni и Zn. Восходящая миграция молибдена, очевидно, идет посредством капиллярной диффузии, компенсирующей отчасти испарение с поверхности болот в течение лета.

Предполагается, что заметная разница уровней содержания меди, наблюдаемая в различных болотах, отражает вариации в значениях pH грунтовых вод. Кислые грунтовые воды, особенно те, реакция которых обусловлена окислением пирита, способствуют переносу меди. Нейтральные или слабо щелочные грунтовые воды затрудняют миграцию меди, но облегчают ее для молибдена. И молибден, и в особенности медь образуют устойчивые комплексы с органическими соединениями в интервале от нейтральных до умеренно низких значений pH.

Присутствие известковистых осадков в почве или рыхлых отложениях уменьшает подвижность меди — очевидно, вследствие осаждения гидроокислов и карбонатов меди. Материал по двум изученным площадям на юге Британской Колумбии иллюстрирует влияние рельефа на рассеяние меди в районах развития известковистых отложений. На ровных участках высокие содержания меди в коренных породах могут не найти отражения в перекрывающих почвах, развитых на перемещенных рыхлых отложениях. Известковистый прослой в данном случае препятствует восходящей миграции меди.

В участках с более крутыми склонами, где высокие содержания меди наблюдались в делювии, гидроморфное рассеяние меди, вероятно, завершается осаждением карбоната меди. Повышение уровня содержания меди обусловлено постоянным просачиванием растворов, снабжающих медью зону осаждения в богатом известью делювии.

Можно было бы ожидать, что высокие значения рН в делювии увеличивают подвижность молибдена, но в действительности значительная концентрация молибдена наблюдается там же, где концентрируется и медь. В то же время часто отмечается одновременное возрастание содержания железа и молибдена, вероятно, вследствие адсорбции последнего на гидроокислах железа.

Выше показаны некоторые аспекты влияния болотных отложений, осадков гидроокислов Fe и Mn и известковистых скоплений на вторичное рассеяние меди и молибдена в Британской Колумбии. Предполагается, что это явление распространено широко и должно предусматриваться при планировании геохимических поисков. Указанные закономерности могут быть предсказаны при анализе региональных особенностей среды, таких, как рельеф, осадки и тип почв, и установлены по отдельным пробам методом частичной экстракции посредством анализа вытяжек на ряд элементов. Мобилизация и перераспределение гидроокислов железа и марганца в системе поверхностных водотоков или в почвенных профилях типичны для площадей с умеренным количеством осадков (свыше 1250 мм в год), таких, как западные районы Британской Колумбии. Осаждение гидроокислов железа и марганца следовало бы ожидать в районах развития вечной мерзлоты, где летом на поверхности таяния из свежеразрушенных мерзлых почв могут образовываться насыщенные водой, богатые органическим веществом илы.

Известковистые скопления характерны для теплого и сухого климата (количество осадков не превышает 625 мм/год), когда выщелачивание

растворимых компонентов из почв и рыхлых отложений проходит не полностью. Такой процесс характерен для климатических условий, которые в течение многих лет преобладают в юго-восточной части Британской Колумбии. В целом условия внешней среды, способствующие значительному осаждению гидроокислов Fe и Mn в поверхностных водотоках и контролирующие образование известковистых отложений, исключают друг друга.

В Британской Колумбии широко распространены заболоченные, насыщенные водой рыхлые отложения, хотя болотистые котловины занимают лишь небольшую часть пространства, а рельеф меняется от средне- до сильнопересеченного. Плохой дренаж и широкое развитие условий заболачивания обычны в центральном внутреннем плато Британской Колумбии. Для того чтобы в болотах образовались скопления молибдена и меди, необходим приток аномально богатых металлами грунтовых вод. Привнос меди в болота особенно облегчается в присутствии активно окисляющегося пирита в пределах области действия грунтовых вод.

Если поисковые работы на молибден и медь проводятся по донным осадкам на площадях с различными природными условиями, как в Британской Колумбии, желательнее анализировать пробы на общее железо, так же как и на Mo и Cu, путем экстракции горячей кислотой. На участках с высоким фоном Fe и Mn можно предполагать осаждение гидроокислов этих металлов в поверхностных водотоках. К слабо контрастным аномалиям молибдена в богатых железом пробах следует подходить с осторожностью, так как они могут быть вызваны соосаждением. Выщелачивание пробы холодным раствором оксалата аммония позволяет ярко продемонстрировать, как этот реагент удаляет из пробы железо, марганец и сопутствующие микроэлементы, оставляя почти нетронутыми решетки силикатных минералов [12]. Если значительная доля валового содержания молибдена в пробах, богатых железом, экстрагируется оксалатом аммония, видимо, происходит соосаждение этих элементов.

Определение содержания органического углерода в донных осадках в сочетании с изучением природных условий дает возможность выделить пробы из заболоченных участков, где может происходить концентрирование меди и молибдена. Если большая часть валового содержания меди в пробе быстро экстрагируется комплексным реагентом, таким, как разбавленный раствор EDTA, это объясняется, видимо, наличием металлоорганических комплексов.

Присутствие извести в пробах часто обна-

руживается по сильному вскипанию с выделением CO_2 при добавлении крепкой кислоты, и если в присутствии извести большая доля меди осаждается в виде карбонатов, это легко доказать экстракцией ее разбавленной кислотой. Разбавленная соляная кислота для такой цели непригодна вследствие ее склонности к образованию комплексных соединений с железом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для Британской Колумбии характерно большое разнообразие геохимических условий. Они оказывают значительное влияние на вторичное рассеяние молибдена и меди. В западных районах выпадает большое количество осадков и преобладают кислые подзолистые почвы. К востоку количество осадков заметно уменьшается и в почвах появляются скопления извести. Торфяные болотные отложения встречаются там, где дренаж затруднен, и особенно типичны для центрального внутреннего плато.

На некоторых участках с насыщенными водой почвенными отложениями наблюдается накопление меди в богатом органическом веществом поверхностном слое в тех случаях, когда в болота вливаются кислые (за счет окисления пирита) грунтовые воды. В меньшей степени здесь происходит также обогащение молибденом. На участках, где болота подстилаются слабо щелочными глинами, наблюдается накопление молибдена с некоторым количеством вольфрама, но без меди. В этих условиях не было ни одного случая какого-либо накопления Fe, Mn, Co, Ni, Pb или Zn.

Гидроокислы железа и марганца обычно осаждаются в поверхностных водотоках западных районов, где почвы имеют более кислую реакцию, чем водные потоки. В богатых железом осадках водотоков наблюдается некоторое обогащение молибденом; богатые марганцем отложения имеют высокие концентрации Co.

Известковистые отложения снижают подвижность меди. На ровных участках медная минерализация экранируется известковистым тиллем и в близповерхностном подпочвенном слое никаких аномалий меди не возникает. Однако заметная концентрация меди наблюдается иногда на питающих источниках склонах, покрытых известьсодержащим делювием.

Это исследование иллюстрирует воздействие различных внешних условий на рассеяние микроэлементов, особенно влияние величины ионного потенциала и условий Eh и pH. Кислые грунтовые воды, особенно по соседству с окисляющимся пиритом, способствуют увеличению

подвижности меди, тогда как молибден становится подвижным в слабо щелочных условиях. Подвижность меди и молибдена в разной степени ограничивается образованием металлоорганических комплексов, захватом осадками гидроокислов железа и марганца и осаждением их в присутствии извести.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Boyle R. W., et al., Geochemistry of Pb, Zn, Cu, As, Sb, Mo, Sn, W, Ag, Ni, Co, Cr, Ba and Mn in the Waters and Stream Sediments of the Bathurst — Jacquet River District, New Brunswick, Geol. Survey Canada, Paper 65—42, 50, 1966.
2. Canney F. C., Hydrous Manganese-Iron Oxide Scavenging — Its Effect on Stream Sediment Surveys, Geol. Survey Canada, Paper 66—54, 1966.
3. Corwin A. H., The Formation of Copper Complexes, in Copper Metabolism, John Hopkins Press, Baltimore, Md., 1950.
4. Fraser D. C., Organic Sequestration of Copper, Econ. Geol., 56, 1063—1078, 1961.
5. Garrels R. M., Christ C. L., Solutions, Minerals and Equilibria, Harper and Row, New York, 450, 1965.
6. Godfrey T. J. R., The Lucky Ship Project, unpubl. AMAX report, 1968.
7. Hansuld J. A., Behaviour of Mo in Secondary Dispersion Media, Mining Eng., 18, № 12, 73—77, 1966b.
8. Hornbrook E. H. W., Biogeochemical Prospecting for Molybdenum in West-Central British Columbia, Geol. Survey Canada, Paper 68—56, 1969.
9. Horsnail R. F., et al., Influence of Variations in Secondary Environment on the Metal Content of Drainage Sediments, Quart., Colo. School of Mines, 64, 307, 1969.
10. Hosking K. F. C., Pisarski J. B., Geochemical Surveys in Cornwall, Min. Mag., 112, 179—181, 1965.
11. Jenne E. A., Controls on Mn, Fe, Co, Ni, Cu and Zn Concentrations in Water... in Trace Inorganics in Waters, Am. Chem. Soc. Symposium, Washington, D.C., 337—387, 1968.
12. Le Riche H. H., Weir A. H., A Method of Studying Trace Elements in Soil Fractions, Jour. Soil. Sci., 14, 225, 1963.
13. Ljunggren P., Geochemistry and Radioactivity of Some Manganese and Iron Bog Ores, Geol. Foren. Forh., 77, 33—44, 1955.
14. Lovering T. S., Organic Precipitation of Metallic Copper, USGS Bull., 795C, 1927.
15. Mason B., Principles of Geochemistry, John Wiley, New York, 1958.
16. Mitchell R. L., Trace Elements in Soils, in Chemistry of the Soil, ACS Monograph № 160, Reinhold, New York, 1964.
17. Ng S. K., Bloomfield C., Solution of Some Minor Element Oxides by Decomposing Plant Materials, Plant and Soil, 16, 108—135, 1962.
18. Presant E. W., A Trace Element Study of Podzol Soils, Bathurst District, New Brunswick, Geol. Survey Canada, Paper 66—54, 222—232, 1967.
19. Salmi M., Peat in Prospecting — Applications in Finland, in Geochemical Prospecting in Fennoscandia, John Wiley, N.Y., 1967.
20. Theobald P. K., Jr., et al., The Precipitation of Aluminum, Iron and Manganese at the Junction of Deer Creek with the Snake River in Summit County, Colorado, Geochim. et Cosmochim. Acta, 27, № 2, 121—132, 1963.

ПРОБЛЕМЫ ПРИМЕНЕНИЯ ГЕОХИМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ПОИСКОВ В КОРНУЭЛЛЕ, АНГЛИЯ

К. Ф. Г. Хоскинг

Университет Малайи,
Куала-Лумпур,
западная Малайзия

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы возродился интерес к рудоносности юго-западного района Англии и особенно Корнуэлла, в котором работало более 600 подземных рудников, в основном в пределах пояса длиной около 120 км и шириной 16 км. На этих рудниках добыто значительное количество олова, вольфрама, меди, свинца, цинка, урана, мышьяка, железа, сурьмы, серебра и марганца, а также немного висмутовой, никелевой и кобальтовой руды. Кроме того, из многочисленных ископаемых россыпей добывались касситерит и вольфрамит, а реки, в которые попадали хвосты оловянных рудников, стали местами многочисленных разработок в активных аллювиальных отложениях; из них добывались касситерит рудничных хвостов и иногда медь, извлекавшаяся методом цементации. Иногда из вод водоотводных туннелей медных рудников (например, водоотвода Каунти, сеть туннелей которого, дренирующих рудное поле Сент-Дей, составляет 48 км) медь также извлекалась путем цементации, а охра, использовавшаяся для изготовления красок, собиралась в отстойных колодцах. Наконец, в ограниченных пределах эксплуатировались скопления касситерита, иногда наблюдающиеся в самых верхних горизонтах отложений морских пляжей и в прибрежных активных осадках шельфа, которые обогащались рудным минералом при перемывании рудничных хвостов морскими волнами.

Приведенных выше фактов достаточно, чтобы показать, сколь широк круг проблем, с которым, видимо, встречаются геохимики-поисковики при попытке проведения поисковых работ в этой металлогенической провинции. Представленное ниже описание геологического строения юго-западной части Англии необходимо для полного выяснения природы и значения каждой проблемы, обусловленной последствиями работы горнодобывающей и других отраслей промышленности в прошлые годы.

ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ОЧЕРК

Корнуэлл — полуостров длиной 120 км и шириной в среднем около 30 км, на юго-востоке оканчивающийся Лизардским и Доманским по-

луостровами и отделен от них выходящими на поверхность частями единого взброса.

Полуостров Корнуэлл, исключая указанные выше мелкие полуострова, сложен девонскими и карбоновыми, обычно бескальциевыми регионально метаморфизованными осадочными породами, подвергшимися интенсивной складчатости с частыми разрывными нарушениями. Это «боковые породы оловянных месторождений», которые нередко лишены органических остатков, так что «маркирующие горизонты» обычно отсутствуют. С первично-осадочными породами одновозрастны интрузии и эффузивы основных и ультраосновных пород, называемых в общем зеленокаменными породами. В эти породы в пермо-карбоновое время внедрились гранитный батолит, связанные с ним мелкие дайки и жилы кислых пород, а также минетты. Ореолы термального метаморфизма четко повторяют контуры обнаженных в районе гранитных массивов.

Гидротермальное минералообразование, которое началось до становления последних тел гранитов, сначала привело к развитию в апикальной части гранитных куполов системы грейзеновых жил, по минеральному составу и структурам близких к системам жил в метосадках, перекрывающих гранитные купола. Отдельные жилы в этих системах маломощны (часто мощность их не более нескольких сантиметров) и ограничены по простиранию. Их строение обычно простое, хотя иногда может быть достаточно сложным. Содержание касситерита и вольфрамитов в жилах представляет некоторый практический интерес, хотя значение этих жил всегда было невелико, поскольку содержание металлов в них низкое, а мощность рудных зон достигает первых сотен метров. Жилы могут содержать лишь ограниченное число минеральных видов, но количество отдельных рудных минералов часто значительно. Почти всегда встречается арсенопирит, часты станнин и сфалерит. Простирание жил обычно параллельно простиранию развитых здесь хребтов, сложенных гранитами. В пределах гранитных куполов жилы сходны со сложными по минеральному составу и строению рудными зонами, из которых добыта основная часть корнуэлльских коренных руд олова, вольфрама, мышьяка и меди. Такие рудные зоны (обычно полого падающие, мощностью до 15 м) протягиваются по прости-

ранию на несколько километров. Минерализация, имеющая промышленное значение, прослеживается иногда на глубину более 900 м, хотя обычно эта цифра гораздо меньше. В некоторых жилах, таких, как главная рудная зона рудника Долкоат, отчетливо проявляется первичная зональность, выражающаяся в смене на глубине высокотемпературных цинковых и медных минералов оловосодержащими, но для жил этого рудного пояса характерно также и телескопирование.

Гипотермальная минерализация сменяется соответственно мезотермальной. Иногда мезотермальные минералы (галенит, низкотемпературный сфалерит, сидерит и др.) отлагались в приоткрывающихся более ранних гипотермальных рудных зонах и жилах, а также в трещинах, протягивающихся параллельно соседним гипотермальным рудным зонам, но чаще эти минералы отлагались в разломах, располагающихся примерно под прямым углом к ранним рудным зонам.

В мезозойское время большая часть района, видимо, была сушей и верхняя часть гранитных массивов не перекрывалась осадками, в результате чего некоторые рудные тела были окислены и эродированы. Данные измерений абсолютного возраста показывают, что зарождение мезотермальных минералов происходило по крайней мере в мезозойское и третичное время, а наличие на некоторых рудниках горячих, богатых хлоридами источников можно считать показателем того, что отложение минералов происходит и в настоящее время. В альпийское (миоценовое) время вся территория, расположенная сейчас ниже высотных отметок 128 м над уровнем океана, была покрыта морем. За этим наступлением моря последовало поднятие в плиоцене, приведшее к образованию серий морских платформ; наиболее обширная из них, так называемая двадцатиметровая, занимает большую часть полуострова. Поднятие, сопровождавшееся дальнейшим развитием по крайней мере еще трех платформ, продолжалось и в плейстоцене.

В это время Корнуэлл находился в зоне вечной мерзлоты, недалеко от южной границы ледникового покрова. Временами в течение плейстоцена и к концу его климат становился более умеренным. Таяние снега и льда привело к тому, что рассеянные на поверхности обломки пород передвигались на более низкий уровень. В результате этого большое количество валунов в массе песка и глины, содержащих вблизи оловоносных жил существенное количество касситерита, отложилось в долинах и иногда на некоторых платформах. Эти осадки, образо-

вавшиеся в результате проявления перигляциальной солифлюкции, названы «галечными наносами» или просто «наносами».

Поднятие продолжалось и в современную эпоху, что, вероятно, привело к подъему поверхности суши еще на 9 м по сравнению с плейстоценом. В это время климат был очень влажным и омоложенные реки несли очень большое количество воды, что приводило к углублению их русел и к перемыванию и сортировке галечно-песчаного материала в долинах этих рек. В результате некоторая часть касситерита концентрировалась в россыпях, залегающих непосредственно на коренных породах.

В последующее время изучаемая территория заросла лесом и песчано-галечный материал аккумуляровался в виде гравийных отложений в нижних течениях рек. Этот период сменился временем, когда дно рек в их устье опустилось на 12 м ниже нынешнего уровня моря. В то же самое время гравийные отложения в нижних течениях рек, уже перекрытые лесным покровом и торфом, были затем захоронены под эстуариевыми и морскими осадками, а расположенные в низких участках леса были затоплены.

Наконец, на участках с низкими береговыми обрывами и довольно пологим песчаным и открытым сильным ветрам с моря берегом образовались песчаные дюны.

СВЯЗЬ МЕЖДУ ГЕОЛОГИЕЙ И ГЕОХИМИЧЕСКИМИ ПОИСКАМИ ПО РЫХЛЫМ ОТЛОЖЕНИЯМ

Если игнорировать осложнения, обусловленные заражением территорий в результате деятельности человека, то при изучении геологического строения выясняются следующие важные факты, определяющие методику геохимических поисков в Корнуэлле.

1. Район имеет густо разветвленную речную сеть, и, следовательно, нахождение ореолов соответствующих металлов в активных речных отложениях должно облегчать нахождение коренных месторождений при региональных и детальных поисках и особенно при рекогносцировочных работах. Это действительно хорошо подтверждается в Корнуэлле. Кроме того, установлено, что, хотя в случае олова более сильный контраст может иногда получиться при анализе фракции —20 меш, а не фракции —80 меш, автору не известно ни одного случая, чтобы при использовании для анализа более мелкой фракции аномалия была пропущена; к тому же анализ более мелкой фракции дает удовлетворительные результаты и в том случае, когда исследуется распределение и всех других

металлов, имеющих практическое значение в исследуемом районе.

2. Большая часть территории Корнуэлла покрыта тонким элювиальным почвенным покровом, и поэтому анализ соответственно отобранных проб почвы обычно отчетливо выявляет наличие не выходящих на поверхность рудных месторождений. При всех исследованиях, проведенных автором, анализ фракции —80 меш проб из горизонта В дал вполне удовлетворительные результаты.

При решении вопроса о постановке почвенной геохимической съемки по рыхлым отложениям необходимо учитывать ландшафт района и его высоту над уровнем моря. Впадины, находящиеся в гранитах на большой высоте, заполнены часто неэлювиальными отложениями большой мощности. Горизонталь с отметкой 128 м соответствует береговой линии в плиоцене. Ниже этого уровня поверхность часто относительно ровная, выше она круто поднимается, что частично обусловлено наличием на этой высоте реликтов плиоценовых береговых обрывов. Из сказанного выше следует, что сразу же ниже высоты 128 м приповерхностные отложения могут быть сложены плиоценовыми литоральными осадками, на которых расположены «наносы галечника». Такие отложения должны встречаться гораздо чаще, чем указано в литературе, и поисковые работы, проведенные несколько лет назад в районе Пендарвеса, недалеко от Камборна, показали, что их мощность иногда достигает 30 м.

Расположенные ниже платформы покрыты в основном поднятым береговым материалом, который иногда перекрыт наносами галечников и в некоторых местах также песчаными дюнами. Однако все эти платформы очень узки и поэтому не представляют серьезного препятствия при поисках. Некоторые рудоносные участки покрыты песчаными дюнами (например, участки в районах Гуитиан-Хейл и Перранпорт). Геохимических методов, позволяющих определить положение рудных зон под такими отложениями, не существует, хотя распределение цинка и меди в известковых сцементированных образованиях из дюн, возможно, в очень слабой степени и отражает положение некоторых рудных зон (Хоскинг и Писарски, неопубликованные данные). На результаты, полученные при этих геохимических исследованиях, частично могла повлиять добыча руд на соседних участках.

3. Особенности жил и рудных зон определяют интервал опробования (расстояние между точками отбора проб по определенному почвенному профилю и расстояние между этими профилями), наиболее правильное направление про-

филей и набор элементов, которые необходимо определять.

Поскольку мощность рудных зон и жил невелика, расстояние между точками отбора по профилю тоже должно быть ограниченным. Большая часть поисковых работ проводилась с целью открытия коренных месторождений олова, и, поскольку этот элемент встречается в таких месторождениях в виде химически устойчивого касситерита, который механически рассеивается в почве, опыт показал, что для выявления одиночных рудных зон или жильных серий интервал между точками опробования должен быть не более 8 м, а при поисках одиночных рудных зон его лучше уменьшить до 6 м.

Хотя длина рудных зон и жильных серий колеблется в широких пределах, оптимальное расстояние между поисковыми профилями на первом этапе поисков составляет 60 м. Затем в ходе поисков иногда можно провести опробование по промежуточным профилям. Поскольку простирание рудных зон и жильных серий обычно одинаково и совпадает с простиранием хребтов, сложенных гранитами, и порфировых даек, определение наиболее рационального направления профилей, которое, конечно, должно быть перпендикулярно простиранию различных рудных тел, обычно не вызывает затруднения. В Корнуэлле встречаются рудные тела с аномальным простиранием, поэтому необходимо объективно проанализировать результаты геохимической съемки по рыхлым отложениям. Трудности в выявлении и прослеживании оловоносных рудных зон определяются, кроме того, следующими факторами:

а. Рудные зоны, такие, как Долкоат-Мейн-Лоуд, могут содержать богатые касситеритовые месторождения на глубине; ближе к поверхности наблюдается сфалерит и содержащие медь сульфиды, а также продукты их окисления. В этом случае, хотя почва над такими рудными зонами содержит явно аномальные концентрации меди и цинка, содержание олова в ней проявляет лишь слабую аномальность.

б. Мощность рудной зоны может заметно изменяться по простиранию. Например, мощность крупной рудной зоны Флэт-Лоуд около Камборна изменяется от нескольких метров до нескольких сантиметров. Очевидно, что содержание олова в пробах почвы из точек вдоль этой главной оловоносной рудной зоны будет изменяться в широких пределах.

в. Распространение касситерита в рудных зонах может быть в основном ограничено рудными столбами, которые разделены бедным оловом жильным материалом, хотя в последнем

могут содержаться заметные количества других рудных минералов. Поэтому при оценке коренных месторождений олова определяется не только содержание этого элемента, но и ряда ассоциирующих с ним металлов. Опыт показывает, что в общем наиболее полезными элементами-индикаторами являются мышьяк, медь и цинк.

4. Современный климат и ландшафт указывают на то, что водные источники должны быть богаты металлами, поэтому анализ вод этих источников на тяжелые металлы может дать возможность установить наличие окисленных рудных месторождений. Такой случай действительно имел место в районе среднего Корнуэлла [7], но для рассматриваемого региона в целом этот метод не имеет какого-либо существенного значения при поисковых работах.

При наличии морских карстовых образований анализ находящихся в них выветрелых руд можно использовать для выявления близлежащих окисленных рудных тел. Это было установлено на побережье между Сент-Агнесом и Хейлом (Хоскинг, неопубликованные данные), но и такой метод поисков, видимо, не имеет значения для Корнуэлла.

ПРОБЛЕМА ЗАРАЖЕННЫХ РЫХЛЫХ ОТЛОЖЕНИЙ В РЕЗУЛЬТАТЕ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЧЕЛОВЕКА

Если бы Корнуэлл остался незаселенным, то, безусловно, при поисках не выходящих на поверхность месторождений главную роль играли бы геологические методы, и нет сомнения, что многие месторождения были бы открыты этими методами. Применению геохимических методов поисков благоприятствуют хороший дренаж и небольшая мощность элювиальных рыхлых отложений. Однако такое благоприятное для геохимических поисков положение было значительно изменено в результате деятельности человека. Природа заражения рыхлых отложений, обусловленная этой деятельностью, и проблемы, возникающие при этом, важны для геохимиков и обсуждаются ниже.

В этой статье рассмотрены следующие проблемы.

1. Заражение при добыче полезных ископаемых.

2. Заражение, обусловленное сельскохозяйственными работами.

3. Заражение, вызванное работами в отраслях хозяйства, не указанных в пунктах 1 и 2.

4. Заражение в результате бытовой деятельности.

Заражение при добыче полезных ископаемых. В этом разделе можно выделить следующие подразделы:

а. Заражение при поисках месторождений полезных ископаемых.

б. Заражение при добыче полезных ископаемых.

в. Заражение, связанное с обогащением руд.

г. Заражение при плавлении металлов.

Заражение при поисках месторождений полезных ископаемых. В Корнуэлле, особенно раньше, поиски проводились путем наблюдения визуальных признаков минерализации, таких, как рудные зоны в береговых обрывах и железные шляпы. Иногда рудное тело устанавливалось по запаху окиси мышьяка при горении торфяников и налету видимой окиси мышьяка на земле после сгорания почвы. Существуют поверия, что скрытые рудные тела обнаруживались с помощью ивовой палочки и что иногда наличие «света жилы» (блуждающего огонька?) приводило к открытию новых месторождений. В самом деле, имеется документальное подтверждение того факта, что одна старая женщина указала штейгерам рудников Бассет участок, на котором затем было обнаружено главное рудное тело, причем женщина заявила, что особый свет от рудной залежи привлек ее внимание именно к этому участку [14].

При изучении береговых скал были пройдены штольни; железные шляпы и другие линейные индикаторы возможных рудных зон были проверены шурфами и канавами по простиранию зон, представляющих интерес, и вкрест их простирания. Важно отметить, что отвалы оказались в непосредственной близости от рудных зон, поэтому поисковикам трудно отличить железные шляпы, связанные только с пиритом, от железных шляп, образовавшихся при окислении медьсодержащих сульфидов. К этому мы вернемся ниже. Здесь достаточно только отметить, что такие наблюдения подтверждаются на участке рудника Нанджилес.

При поисках необходимо установить простирание рудных зон, и поэтому, когда данных по поверхности было недостаточно для решения такой задачи, проходил ряд шахт, из которых делались пересечения вкрест направления предположительного простирания рудных зон. В качестве примера можно привести участок к западу от Камборна. Здесь были предприняты работы с целью установить протяженность крупной рудной зоны Долкоат-Мейн-Лоуд и параллельных ей менее важных рудных тел. Ясно, что многие из этих поисковых шахт, которые часты в Корнуэлле, окружены отвалами пустых пород.

Заражение при добыче полезных ископаемых.

В прошлом большинство коренных месторождений обрабатывалось подземными работами и лишь несколько значительных месторождений — открытым способом. Подземные работы включали проходку большого количества шахт по простиранию рудных зон, так что в настоящее время около шахт расположены многочисленные отвалы пород, вынутых при их проходке. Дренаж неглубоких горизонтов рудников осуществлялся, когда это было возможно, штольнями, устья которых выходили в долины или в крутые морские берега. Эти штольни иногда составляли очень широко разветвленные дренажные системы; наиболее крупная штольня Каунти служила путем водостока в меднорудном поле Сент-Дей и представляла собой систему подземных туннелей около 50 км длиной.

В рудном поле Корнуэлла видны буквально тысячи рудничных отвалов, и, естественно, их материал мог заражать почву, воды и отложения поверхностных водотоков близлежащих участков.

Очевидно, что природа и степень этого заражения зависят от многих факторов. Металлы, выносившиеся из отвалов, определялись составом последних. Как было показано выше, многие мелкие отвалы являются результатом неудачных поисков в пустых породах, так что около них не наблюдается никакого заражения поверхностных водотоков или почвы. Количество «тяжелых» металлов, выносимое из отвалов, зависит, кроме всего прочего, не только от абсолютного их количества в отвалах, но и от формы их нахождения, от наличия растворимых минералов этих металлов и их количества, от пространственных взаимоотношений между минералами этих элементов. Так, например, халькопирит, рассеянный в кварцевой жильной массе, будет гораздо труднее разрушаться «поверхностными агентами», чем мономинеральные куски самого сульфида. Халькопирит, ассоциирующий с большим количеством пирита или с марказитом, будет разрушаться значительно быстрее, чем в том случае, когда в руде содержится только один этот сульфид. Когда халькопирит ассоциирует с пиритом и значительным количеством арсенопирита, большая часть меди, освобождающейся при выветривании халькопирита, видимо, быстро осаждается в виде нерастворимого арсената. Кроме того, медь в руде из зон окисления в значительной степени присутствует в виде нерастворимых кристаллов вторичных минералов и поэтому выносится из них гораздо труднее, чем из сульфидов.

Количество выносимых в определенное вре-

мя металлов зависит также от физических особенностей отвалов и от морфологии последних. Так, если отвал в значительной степени сложен крупными блоками породы, то вода может свободно проходить через него, но, с другой стороны, если отвал содержит большое количество глинистого материала, то он становится практически непроницаемым для воды. К тому же проникновение дождевой воды в отвал зависит от формы и размера слагающих его глыб. Очевидно, что плитки сланцев должны вести себя подобно крыше над отвалом, в то время как сквозь отвал из изометричных глыб гранитов дождевая вода проходит легко. Количество выносимых металлов при прочих равных условиях должно в некоторой степени зависеть и от формы отвала. Оно, видимо, понижается с увеличением угла откоса отвала. Возможно также, что при постоянных климатических условиях количество тяжелых металлов, выносимых из отвала в течение нескольких лет, часто зависит от его возраста. Максимальный вынос должен происходить во время накопления отвала или сразу после его формирования, поскольку в это время неустойчивые в поверхностных условиях минералы наименее защищены «рубашками», образующимися при окислении, а отвалы наиболее проницаемы для воды. Позже внешние зоны многих нестабильных в экзогенных условиях минералов будут замещены вторичными минералами, защищающими первые от дальнейшего изменения, отвалы уплотняются под действием силы тяжести, а каналы, по которым проникала вода, закроются тонкозернистым материалом, вынесенным из верхних горизонтов. Все это приводит к снижению выноса тяжелых металлов из отвалов. Кроме того, вынос из поверхностных частей отвалов и сопутствующая такому процессу аккумуляция глины и других мелких частиц в каналах часто создают условия, благоприятствующие росту растений, а растения в свою очередь уменьшают количество дождевой воды, попадающей в центральные части отвала.

Хотя степень заражения из рудничных отвалов зависит в большой мере от указанных выше факторов, частично она определяется также и особенностями рельефа. Ясно, например, что при равнинном рельефе зона зараженной почвы будет ограничена, как это наблюдается в окрестностях богатых медью отвалов рудника Уил-Алфред вблизи Хейла [3], а на склоне холма или в долине ниже рудничных отвалов будет наблюдаться широкий ореол заражения. Также очевидно, что, когда отвал расположен на берегу реки, компоненты, выносимые из него путем выщелачивания, смыва-

ния и оползания, заражают эту дренажную систему, хотя и беспорядочным путем, но совершенно независимо от распределения, продолжительности и интенсивности действия дождевых вод и периода времени существования отвала.

Из отмеченного выше видно, что где бы в Корнуэлле ни находился рудник, речная вода, видимо, заражается рудничными водами, вытекающими из штолен и несущими значительные количества меди, цинка и других металлов. В качестве примера заражения речной воды, в которую попадают воды из штольни, можно привести область Перранпорта. Степень этого заражения показана на фиг. 1 (по неопубликованным данным Хоскинга и Писарски). Наиболее яркий пример представляют воды самой реки Карнон, западный Корнуэлл, которые сильно заражены обогащенными медью водами из частично обвалившейся штольни Каунти, являющейся дренажной системой для рудничного поля Сент-Дей. В прошлом медь осаждалась из вытекающих вод путем цементации (металлическая медь обычно наблюдается в брикетах продуктов флотации, которая проводится компанией «Гидравлик-тин», извлекающей касситерит из хвостов ниже в долине; медь, несомненно, выносится из этого рудничного поля). Окислы железа, находившиеся в водах в виде взвешенных частичек с абсорбированными на них металлами, накапливались в отстойных колодцах, в настоящее время сильно заросших, и продавались затем в виде охры. В настоящее время вода из штолен из-за ее высокой кислотности и, возможно, высокого содержания в ней металлов считается непригодной для животноводства. О степени заражения этими водами рек можно судить по заметным различиям в содержаниях металлов между водами этой и соседней рек вблизи обогатительной установки компании «Гидравлик-тин» что видно из анализов, выполненных в 1959 г. [10].

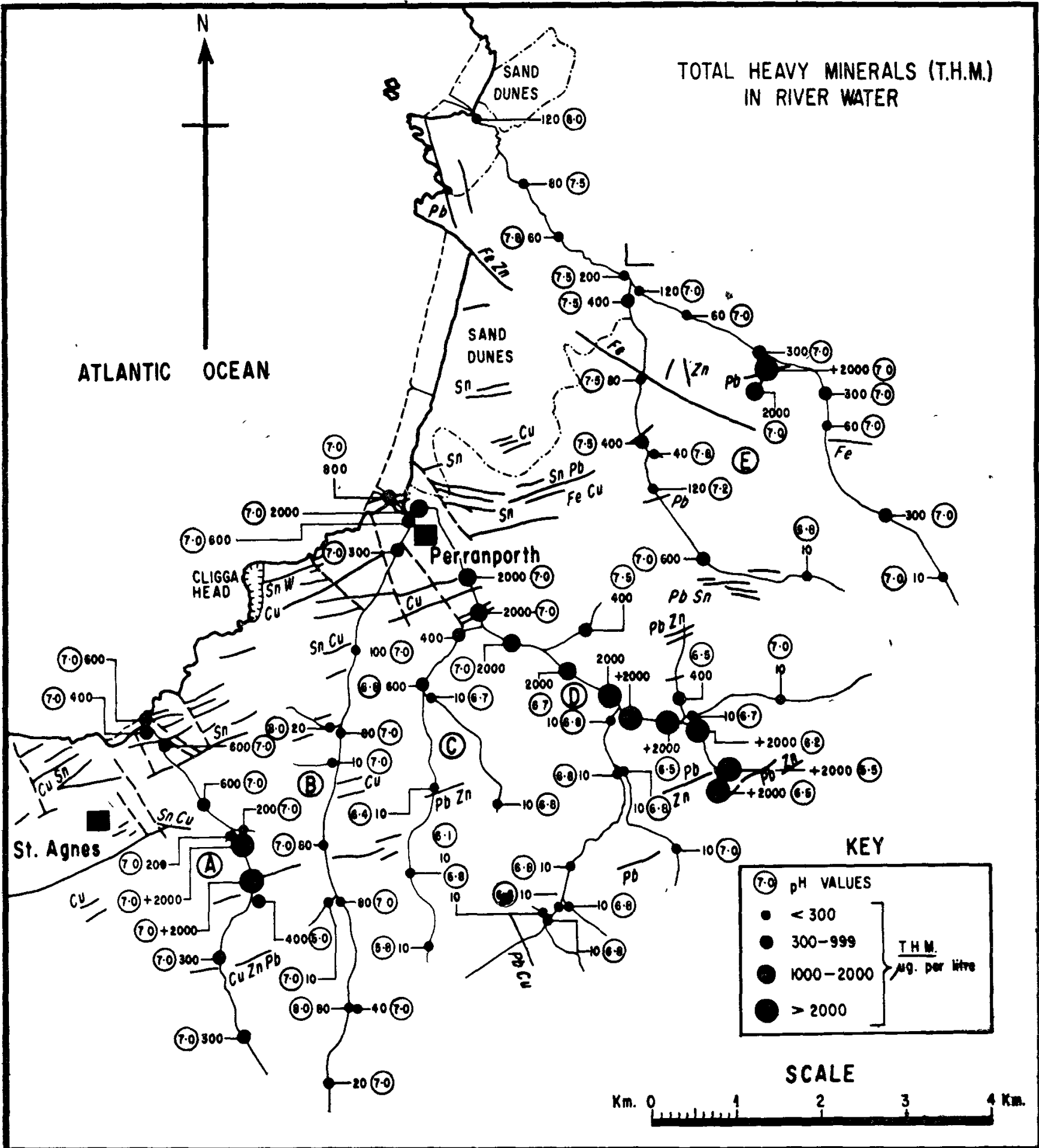
Компоненты	Содержание, млн ⁻¹
А. Река Карнон	
Сульфат меди	6,027
Сульфат железа	7,612
Сульфат алюминия	80,41
Сульфат магния	35,85
Хлорид кальция	60,73
Хлорид магния	1,40
Хлориды натрия и калия	54,62
Коллоидный кремнезем	4,949
Окись олова	0,051
pH	5,2
Б. Соседняя река	
Сульфат меди	0
Сульфат железа	0

Сульфат алюминия	0
Сульфат магния	6,21
Хлорид кальция	48,35
Хлорид магния	0
Хлориды магния и калия	4,2
Коллоидный кремнезем	21,8
Окись олова	0,2
pH	6,4

Еще одним эффективным показателем высокого содержания металлов в реке Карнон, обусловленным в основном привносом системы туннелей Каунти-Адит, является тот факт, что некоторые устрицы, выловленные в устье реки Карнон, впадающей в эстуарий Каррик-Роудс, имеют зеленую окраску. Высокое содержание цинка и меди в этих моллюсках можно выявить, воздействуя на них ртутным тиоцианатом аммония без их озоления, в результате чего образуются темно-красные мшистые дендриты (Хоскинг, неопубликованные данные).

Расстояние, на котором в реке ниже устья штольни заметно заражение, зависит от многих факторов, таких, как величина реки, скорость течения воды в ней, концентрация тяжелых металлов в воде, вытекающей из горных выработок, количество этой воды, которое вливается в реку в единицу времени, количество органического материала, глины и окиси железа, абсорбирующих из воды по крайней мере часть ионов тяжелых металлов, а также климатические факторы, превалирующие непосредственно перед временем изучения. Дождь обычно понижает концентрацию металлов в речной воде, но если сильный ливень проходит после долгого сухого периода, он может вымыть растворимые продукты окисления из поверхности частей рудника и, таким образом, вызвать заметное временное повышение содержания металлов в воде, вытекающей из горных выработок, и, следовательно, в реке, в которую эта вода поступает.

Несмотря на очевидность сделанных выше выводов, в воде, просачивающейся из рудной зоны в мелкие выработки экспериментального рудника Горной школы в Камборне, установлены очень слабые изменения содержания меди, цинка, железа и мышьяка (измерения проводились в течение года). К тому же исследования Хоскинга и Писарски [13] показали, что содержание меди во фракции осадков — 80 меш, взятых из рек в Корнуэлле на участке Сент-Агнес — Перранпорт зимой 1960—1961 гг., мало отличалось от ее содержания в пробах, отобранных приблизительно в тех же местах летом 1963 г. Учитывая это, можно сделать вывод, что приток воды, содержащей медь, в речную систему сопровождался постоянным извлечением этого металла из речной воды, главным обра-



ФИГ. 1. Карта рассеяния металлов, обусловленного заражением речных вод стоками из заброшенных рудников в районе Перранпорта, западный Корнуэлл.

зом путем абсорбции на коллоидах. Поскольку металл должен привноситься из его источников постоянно в течение года или в очень частые интервалы времени, содержащие медь воды, обусловившие наличие этого металла в осадках, являются в основном грунтовыми водами, которые путем инфильтрации, а также в виде источников и вод, вытекающих из горных выработок, вливаются в речную систему. Привнос меди поверхностными водотоками из отвалов в периоды, следующие за дождями, должен быть гораздо более неравномерным, и, поскольку вода находится в контакте с медьсодержащими минералами только в течение очень короткого времени, содержание этого металла в ней должно быть относительно низким. Привнос твердого медьсодержащего материала поверхностными потоками, ветром и под действием гравитации также должен происходить очень неравномерно, и в связи с гетерогенной природой отвалов содержание меди в привносном материале должно изменяться в широких пределах. Содержание меди не может быть значительным, поскольку при выщелачивании существует тенденция к предпочтительному выносу меди только из тонкой поверхностной части отвалов, а именно медь и является главной фракцией, которая сносится в реки.

Если вода из горных выработок стекает в реку по заиленным водотокам, то последняя должна засоряться илом. В последующий за сильными ливнями период рудничные воды могут затопить прилегающие участки, при этом из них осаждаются тяжелые металлы в токсичных для растительности количествах. В самом деле, растения с физиологическими аномалиями, обусловленными избытком токсичных элементов в почве, наиболее часто встречаются вблизи дренажных туннелей, в меньшей мере вдоль рек, в которые попадают рудничные хвосты, а также над покрытыми почвой рудничными отвалами. На ферме Грэй около Кегеланда (район Камборна) затопление луга, который находится около туннеля, дренирующего рудник Вест-Вайолет-Сетон (заброшенный медный рудник со сфалеритом, галенитом и арсенопиритом), так заражало землю токсичными элементами (см. табл. I), что растения, особенно трава и черная смородина, заметно желтели [3]. Зоны рассеяния металлов образуются также вдоль троп, проложенных горняками от шахт к помещениям, где они меняют одежду, или к душевым, а также к жилым поселкам. Старатели, добывавшие оловянную руду из отвалов рудника Долкоат после его закрытия в начале 20-х годов, считали такие тропинки особенно полезными поисковыми указателями. Однако

Таблица I

Содержания тяжелых металлов в почве, периодически затопляемой водой из штольни рудника Уил-Вайолет-Сетон

Номера проб	Почвенный горизонт	Содержание, млн-1			pH
		Pb	Zn	Cu	
1	A (верхний почвенный)	140	1690	81	5,7
	B (подпочвенный)	116	1600	72	5,9
2	A	284	760	68	5,6
	B	178	1264	49	6,1
3	A	128	696	66	5,4
	B	140	408	44	6,0
	Фоновые содержания	20	50	30—40	6

заражение участков вдоль тропинок касситеритом и другими сравнительно нерастворимыми минералами происходит только в приповерхностном слое. Так, на примере вольфрамитового рудника Касл-эн-Дайнес показано, что вольфрамом заражены только верхние несколько сантиметров почвы под тропами, по которым ходили горняки. Здесь уместно также заметить, что потери руды на руднике Касл-эн-Дайнес при ее транспортировке по подвесной дороге фиксируются в виде непрерывной зоны заражения поверхности вольфрамом вдоль этой дороги, причем максимальные концентрации элемента установлены у основания опор, поскольку обычно здесь происходило встряхивание вагонеток [5].

В настоящее время многие рудничные тропы заросли и, следовательно, могут ввести в заблуждение при проведении геохимических поисков, особенно если анализируемые пробы взяты из самых приповерхностных горизонтов. При опробовании более глубоких горизонтов подобные затруднения тем более возможны, если анализируются такие подвижные элементы, как медь и цинк, и если рудники в районе были богаты рудой, содержащей сульфиды этих элементов в ассоциации с пиритом, марказитом или пирротинном. В таких условиях легко окисляющееся железо сульфидов дает сульфат окисного железа — прекрасный растворитель для сульфидов многих других элементов. Электроэффект также способствует гораздо более быстрому растворению некоторых компонентов сложных сульфидных руд по сравнению с растворимостью этих компонентов в тех же условиях, но в изолированном от других сульфидов состоянии.

Рудники в коренных породах в Корнуэлле, где олово, вольфрам и медь добывались откры-

тым способом, окружены обширными отвалами, и вытекающие из них дренажные воды заражают металлами почву, а также осадки и поверхностные водотоки, так же как и дренажные воды, выносимые из подземных выработок.

Рудники, работавшие на россыях, представляют самостоятельную проблему при геохимических поисках. Вероятно, три четверти всех рек в Корнуэлле содержали определенное количество олова в россыях, которые образуются непосредственно на плотике. Большая часть этих месторождений уже давно отработана весьма примитивными методами, которые не могли привести к полному извлечению касситерита из россыпи.

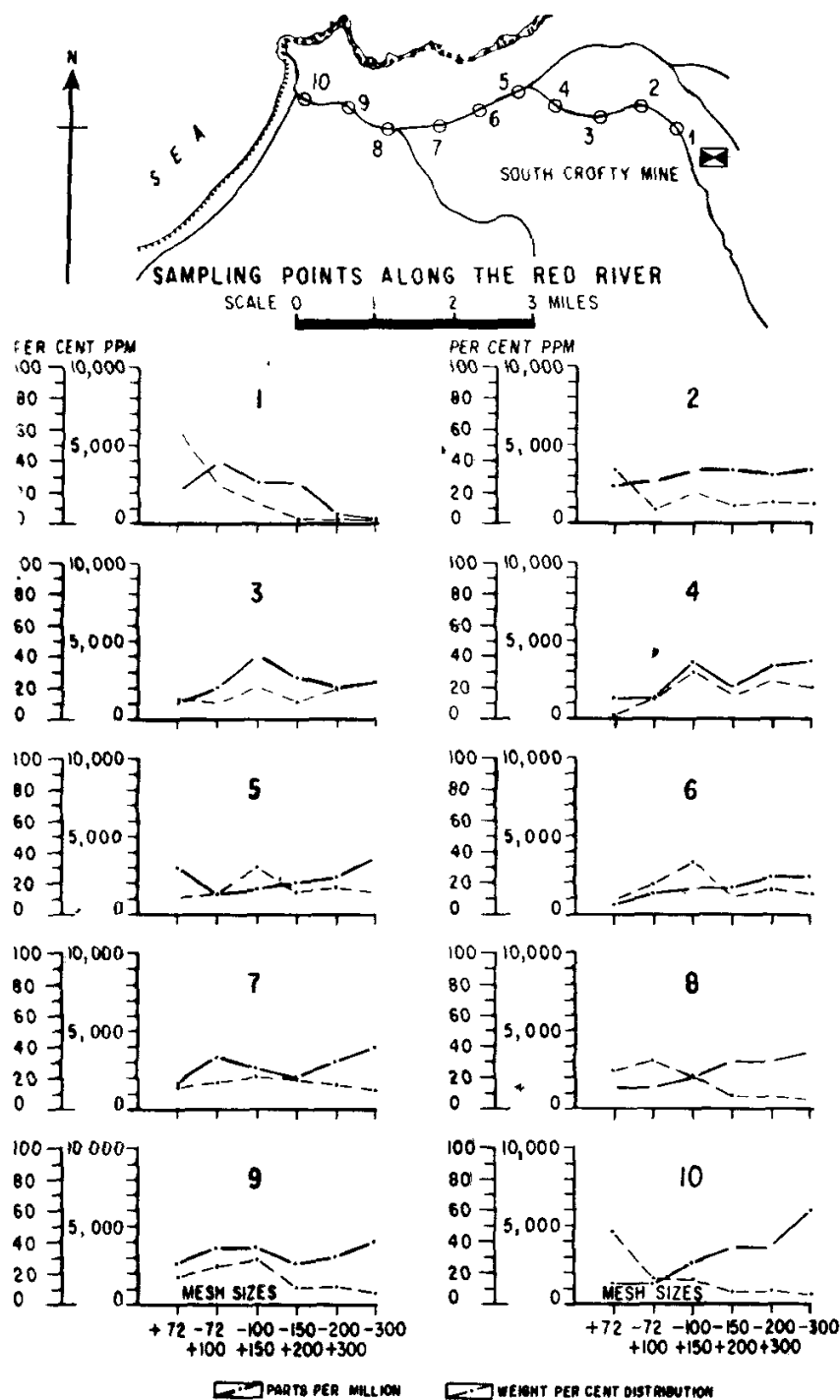
В районах таких работ множество мелких шахт, причем некоторые из них сейчас заполнены водой (например, в гранитах массива Карменеллис) и окружены отвалами пустых пород. В гранитах массива Карменеллис и, вероятно, вблизи всех выходов гранитов наиболее богатые остаточные россыпи образовались непосредственно над материнскими рудными зонами, поэтому в их окрестностях рыхлый материал из отвалов и рек, в которых производилась промывка оловянного концентрата, наиболее обогащен оловом. Следовательно, геохимические анализы (особенно донных отложений) в таких районах позволяют выявить богатые остаточные россыпи и участки, где, видимо, могут присутствовать частично вскрытые рудные зоны, которые можно проследить почвенной геохимической съемкой на олово. Из россыпей, разрабатывавшихся в нижнем течении рек, обычно извлекался уже переотложенный касситерит, вследствие чего в приповерхностных отложениях этих участков можно обнаружить высокие концентрации олова, не связанные с материнскими рудными зонами.

Заражение, связанное с обогащением руд. Обогащительные фабрики всегда строились вблизи рек, в которые уходила большая часть хвостов, в результате чего река ниже фабрики заражалась до самого эстуария или моря. Это обусловлено частично еще и тем, что рудники обычно расположены не далее 15 км от эстуария или моря. Особенно отчетливо можно видеть суспензию белой глины, попадающую в реку от фабрик, занимающихся обогащением каолина. Вода реки Фал почти повсеместно загрязнена каолином, который отлагается во время высокой воды там, где речная вода смешивается с соленой водой эстуария Каррик-Роудс. Аналогичное явление можно наблюдать в реке Рэд, несущей в виде суспензии красный гематит из рудного поля Камборн — Редрат к морю на расстояние около 10 км.

В течение последнего столетия реки, промывающие хвосты наиболее важных рудничных участков, часто сильно заиливались в нижнем течении в результате затопления. В качестве примера можно привести ту же реку Рэд. При затоплении осаждалось значительное количество сульфидов меди, особенно халькозина; в результате повторного затопления большая часть неокислившихся сульфидов быстро захоронялась. На наличие таких сульфидов в аллювиальных отложениях района указывал еще Стефенс [15], наблюдавший их при бурении скважин в этом районе. Без сомнения, во время затопления на площади, оказавшейся под водой, происходило осаждение значительного количества других минералов, в том числе и касситерита.

Некоторое представление о степени заражения речных отложений оловом в прошлом в результате потерь в хвостах фабрик, обогащавших первичные руды, можно составить по данным Томаса [16]. Он сообщает, что в 1890 г. добыча 15 рудников, работавших в районе Камборн — Редрат, составила 7131 т оловянного концентрата, проданного за 386 029 фунтов стерлингов, тогда как добыча из хвостов этих рудников в реках Рэд и Портрит составляла 1730 т концентрата, проданного за 69 208 фунтов стерлингов. Томас приходит к выводу: «Если принять во внимание все источники потерь и неточность при взвешивании жильной массы перед дроблением, средние потери олова на рудниках Корнуэлла в настоящее время (т. е. в 1913 г.) составляют не менее 30%». Далее он утверждает, что не знает ни одного рудника в Корнуэлле, на котором потери были бы меньше 30%, но ему известны рудники, где потери превышают 40%, а на двух исследованных им рудниках они достигают 60%.

Оловянный рудник Саут-Крофти, хвосты которого попадают в реку Рэд, видимо, извлекает не более 85% касситерита, находящегося в руде. На 59-м ежегодном собрании акционеров рудника Саут-Крофти сообщалось, что за год на фабрике было обогащено 89 824 т руды с содержанием 11,4 кг касситерита на 1 т. Если весь не извлеченный из руды за этот период касситерит попал в реку Рэд, то привнос его в эту речную систему составил около 106 т. Некоторые данные о распределении различных по размерам фракций в пробах активных осадков реки Рэд в 1960 г. и о содержании в них олова приведены на фиг. 2. Однако, как указывали Хоскинг и Онг [12], полученные результаты в некоторой степени расходятся с действительностью, поскольку метод отбора проб был таким, что самая мелкая фракция никогда не



ФИГ. 2. Распределение различных по размерам фракций и содержаний олова в каждой фракции из проб активных аллювиальных отложений в реке Рэд, западный Корнуэлл, в которую постоянно попадают хвосты из рудника Саут-Крофти.

попадала в пробу, а разделение по фракциям проводилось сухими ситами, в результате чего более мелкие частицы иногда прилипали к более крупным зернам и, следовательно, анализировались в составе крупной фракции. Кроме того, содержание олова определялось полуквантитативным колориметрическим методом.

Большой интерес для практики геохимических поисков представляет и тот факт, что реки, на которых обогатительные фабрики многие годы уже не работают, все еще сильно заражены. Например, в рудном поле северо-восточного Корнуэлла, где добывались свинец и сурьма, фракция осадков — 80 меш реки Оллен в 8 км

ниже давно заброшенной обогатительной фабрики рудника Пенджена содержит явно аномальное количество свинца, которое изменяется от 3000 млн⁻¹ до 150 млн⁻¹ [16]. Это явление обусловлено многими факторами: слабым рассеянием рудничных хвостов рекой, продолжающимся привносом в реку материала из остаточных отвалов в результате смывания их покровной части, привносом материала с прибрежных участков при оползнях. Кроме того, по рекам, дренирующим рудные поля с оловянными месторождениями, таким, как река Рэд, производится добыча только чистого касситерита, а касситерит в сростании с другими минералами из песчаной фракции речных отложений не извлекается. Потери при такой добыче также являются источником заражения реки касситеритом. При работах в русле реки всегда происходило много отстойных колодцев. В давно заброшенных отстойных колодцах обычно содержится большое количество легко растворимого цинка и других металлов, вызывающее пожелтение растительности. Часто районы этих выработок содержат так много мышьяка, что пасущийся там домашний скот страдает от легкого отравления мышьяком.

Заражение мышьяком обусловлено не только арсенопиритом и другими мышьяксодержащими минералами, имеющимися в хвостах обогатительных фабрик, но вызвано, кроме того, обогащением оловянных руд из полиметаллических рудных зон, включающим кальцинирование, при котором сульфиды и сульфоарсениды переходят в компоненты, легко отделимые от касситерита гравитационным или магнитным методами. При кальцинировании имеющийся в руде мышьяк переходил в As_2O_3 и As_2O_5 , а эти сублиматы частично оседали в трубах обогатительной установки, откуда они периодически извлекались и продавались. Сернистый газ, выделяющийся при кальцинировании сульфидов проходил через градирни в конце труб; совместно с ним выделялось и ощутимое количество окислов мышьяка. Дождь захватывал значительное количество этих окислов из атмосферы и переносил их в почву. Действительно, в 1851 г. в связи с гибелью крупного рогатого скота и других животных, отравившихся травой с подветренной стороны градирен [1], было возбуждено дело против владельцев завода «Перран-Смелтинг-Хаус» по производству «белого мышьяка» путем кальцинирования руд. В дальнейшем следует установить, сколько времени почва вблизи мышьяковых градирен остается зараженной, поскольку окислы мышьяка переходят в ионы арсената, осаждающиеся в виде относительно нерастворимого арсената

железа. Обычно обогатительные фабрики в Корнуэлле устанавливались на реках с большим дебитом воды. Следовательно, в речных отложениях, контаминированных при обогащении руд коренных месторождений, можно обнаружить аномальные концентрации металлов, особенно олова. Это видно на примере участка Лендс-Энд, где ниже обогатительной фабрики речные осадки во фракции —80 меш содержат более 5000 млн⁻¹ олова [8].

Привнос «чужих» элементов в локальные поверхностные водотоки происходит около обогатительной фабрики Горной школы Камборна, расположенной вблизи Трун. На этой фабрике были исследованы все типы руд района и в результате в реке ниже стока хвостов фабрики были найдены наиболее типичные ассоциации металлов, присутствующих в рудах. Несколько лет назад один из геохимиков, незнакомый с системой работы обогатительной установки, ликовал, когда установил высокое содержание тантала в речных отложениях этого района! Следует также помнить, что использование растворимых металлических компонентов при обработке руд и глин может привести к привносу значительных концентраций металлов в речные отложения ниже обогатительных фабрик.

На фабрике компании «Гидравлик-тин» в Биссо обогащается не только россыпное олово, но и хвосты заброшенных рудников, находившихся выше по реке, а также отвалы неработающих рудников и хвосты соседней старой обогащавшей мышьяк установки, для которой привозился материал из многих рудников. Представление о разнообразии элементов, которые могут находиться в отложениях реки Карнон и, следовательно, эстуария Каррик-Роудс благодаря обычным потерям обогатительных фабрик, дает анализ пробы взвешенной фракции на фабрике компании «Гидравлик-тин», отобранной в 1958 г. [10].

Элемент или окись	Содержание, %
Серебро	0,00935
Золото	0,00005
Олово	1,19
Свинец	0,72
Медь	12,90
Висмут	0,094
Мышьяк	9,30
Сурьма	0,11
Селен	0,020
Теллур	0
Железо	35,66
Алюминий	0,24
Титан	0,035
Марганец	0,01
Цинк	1,75
Никель	0,02
Кобальт	0,015

Известь	0,02
Магний	0,08
Окись вольфрама (WO ₃)	0
Кремний	0,33
Сера	37,20
Хлор	Следы
Пятиокись фосфора	Следы
Фтор	0
Кислород и общая вода	0,29
<hr/>	
Сумма	100,00

Вероятно также, что перегрузка реки хвостами, даже если они представляют просто каолиновую глину, будет настолько изменять «местные» донные отложения с аномальным количеством металлов, обусловленным наличием в этом районе неизвестного рудного тела, что геохимическими методами, включая анализ донных отложений, не удастся установить наличие аномальной зоны. Однако в том случае, когда рудная зона приурочена к долине, по которой течет река, зараженная хвостами обогатительных фабрик, ее можно установить анализами проб речных отложений, находящихся ближе к истокам. Конечно, при таких обстоятельствах обнаружение руды возможно только в случае очень высоких содержаний элементов. Несколько лет назад этот вывод был подтвержден автором при изучении протекающей в Чейсуотере реки, в которую стекали хвосты рудника Уил-Бази, богатые оловом, медью и мышьяком.

Заражение при плавлении металлов. Бартон [1] перечисляет в Корнуэлле 28 заводов, выплавляющих олово, но отмечает, что были еще и заводы, разбросанные по всей области. Последний из них закрылся в 1931 г. Кроме того, выплавлялась медь (Хейл, район Сент-Остелла), а также свинец (Пенпол и Чарлзтаун). Места расположения некоторых плавильных заводов [1], а также предшествовавших заводам многочисленных «плавилен» не известны.

Когда работали плавильные заводы, грунт вблизи них заражался металлами, терявшимися в виде пыли. Кроме того, вокруг многих таких заводов накопились горы шлака и, хотя большая часть их не разрушалась сразу агентами выветривания, какое-то количество меди, олова и других элементов, которые находились в металлическом состоянии и были в контакте с атмосферой, видимо, выносились из этого шлака. Тонкозернистая фракция шлаковых отвалов вблизи рек сносилась в эти реки и становилась частью активных осадков дренажной системы.

Иногда шлак ссыпался в прямоугольные блоки и использовался при постройке стен различных сооружений. Так, на участке медеплавиль-

ного завода в Хейле стены приливного бьефа, а также производственных помещений и даже жилых домов сооружены в основном из таких блоков медного шлака. На некоторых из них видны пятна голубовато-зеленого цвета, обусловленные окислением меди. Иногда блоки оловянного и медного шлака используются для изгородей, окружающих поля. Во время войны 1939—1945 гг. некоторые отвалы оловянного шлака были вывезены и еще раз обогащены для переплавки за пределами района. Видимо, приповерхностные пробы почвы, по крайней мере из этих участков, могут содержать аномальные концентрации олова.

Хотя в Корнуэлле не проводилось исследований, устанавливающих, заражены ли еще участки, на которых ранее располагались плавильные заводы, и в какой степени заражение снижается со временем, Хоскинг и Обиал [10] предположили, что высокая концентрация олова (иногда более 2500 млн^{-1}) во фракции активных осадков — 80 меш в реке Труро может быть частично обусловлена наличием большого количества оловоплавильных заводов, работавших в этом районе.

Заражение, обусловленное сельскохозяйственной деятельностью, определяется в значительной мере стремлением фермеров восстановить свою землю, улучшить ее качество, воспрепятствовать всему, что снижает урожай, и быть уверенным, что его скот потребляет хорошую воду.

Особенно в прошлое время фермеры, улучшая торфяные земли, перемещали валуны и глыбы выходящих на поверхность коренных пород, включая и «железные шляпы», к окраинам участков, где складывали все, сооружая изгороди и заваливая некоторые поисковые шурфы и каналы. Территория, занятая шахтами и отвалами пустой породы, освобождалась при разборке камней для постройки изгородей и дорог. Сейчас отвалы частично или полностью можно сдвинуть бульдозерами в шахты. Затем на ровную поверхность привозится почва, чтобы покрыть территорию, освобожденную из-под отвала. Фермеры, на участках которых мало камней, обычно приобретали их для изгородей с отвалов ближайших шахт. Вновь образовавшиеся многочисленные линейные зоны заражения, конечно, затрудняют поиски месторождений. Почва около изгороди, сложенной из материала, богатого сульфидной рудой, на несколько десятков сантиметров в обе стороны часто заражена цинком или медью, а возможно, и обоими элементами. Обычно такое заражение легко установить. Поэтому при поисковых работах пробы почвы отбираются только на рас-

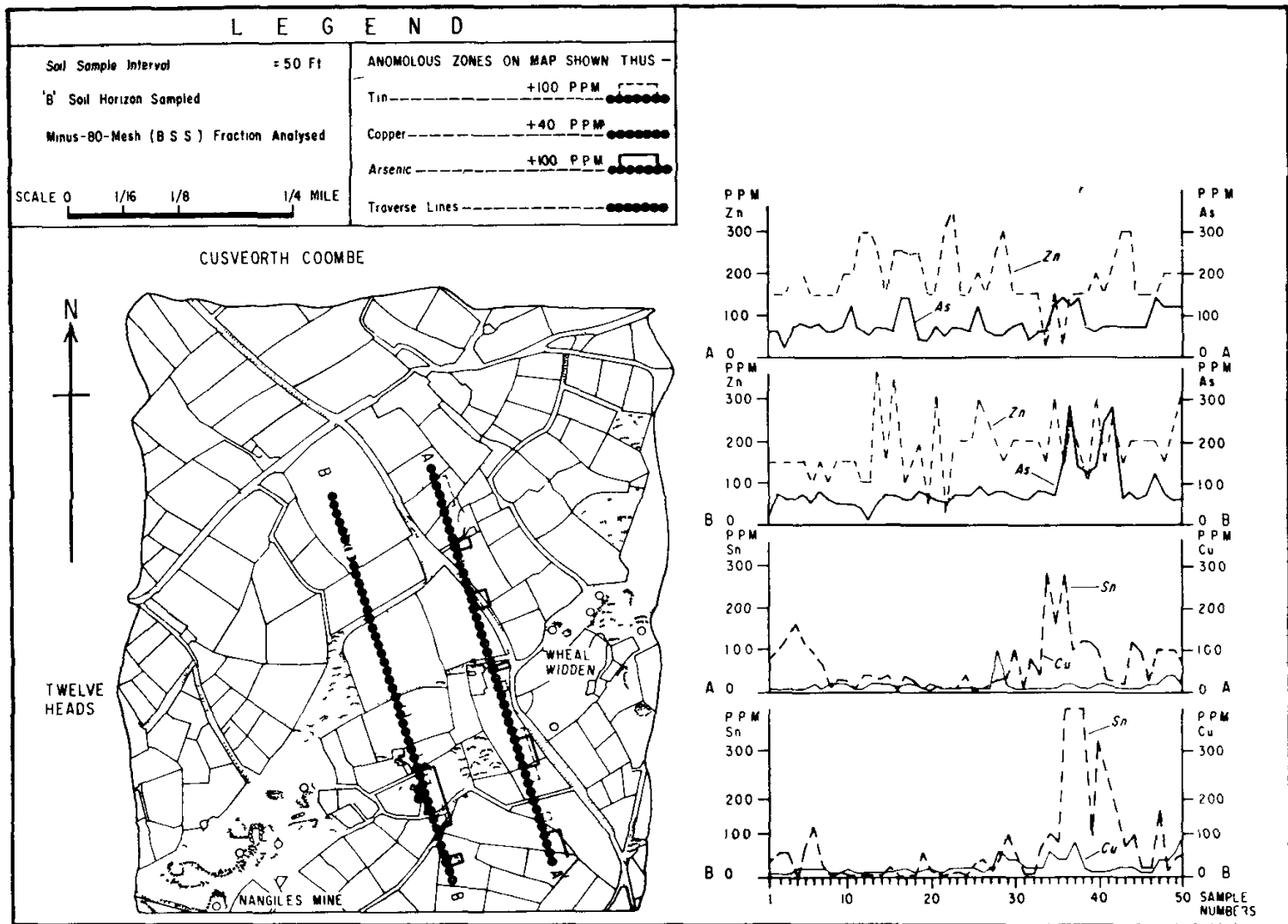
стоянии более 3 м от таких изгородей. Подобные зоны заражения окаймляют и дороги, сооруженные фермерами из «рудничного» камня.

Территории, освобожденные от отвалов и покрытые относительно тонким слоем почвы, привезенной фермерами, также могут ввести в заблуждение неосторожного геохимика. Концентрации металлов в пробах, взятых с таких участков, особенно вблизи подошвы почвенного слоя, обычно резко колеблются, что сразу же должно настораживать. Старые рудничные отвалы, наличие блоков невыветрелых пород на небольшой глубине, а также, конечно, изучение старых карт и беседы с фермерами помогут обнаружить неестественный характер вертикального почвенного разреза.

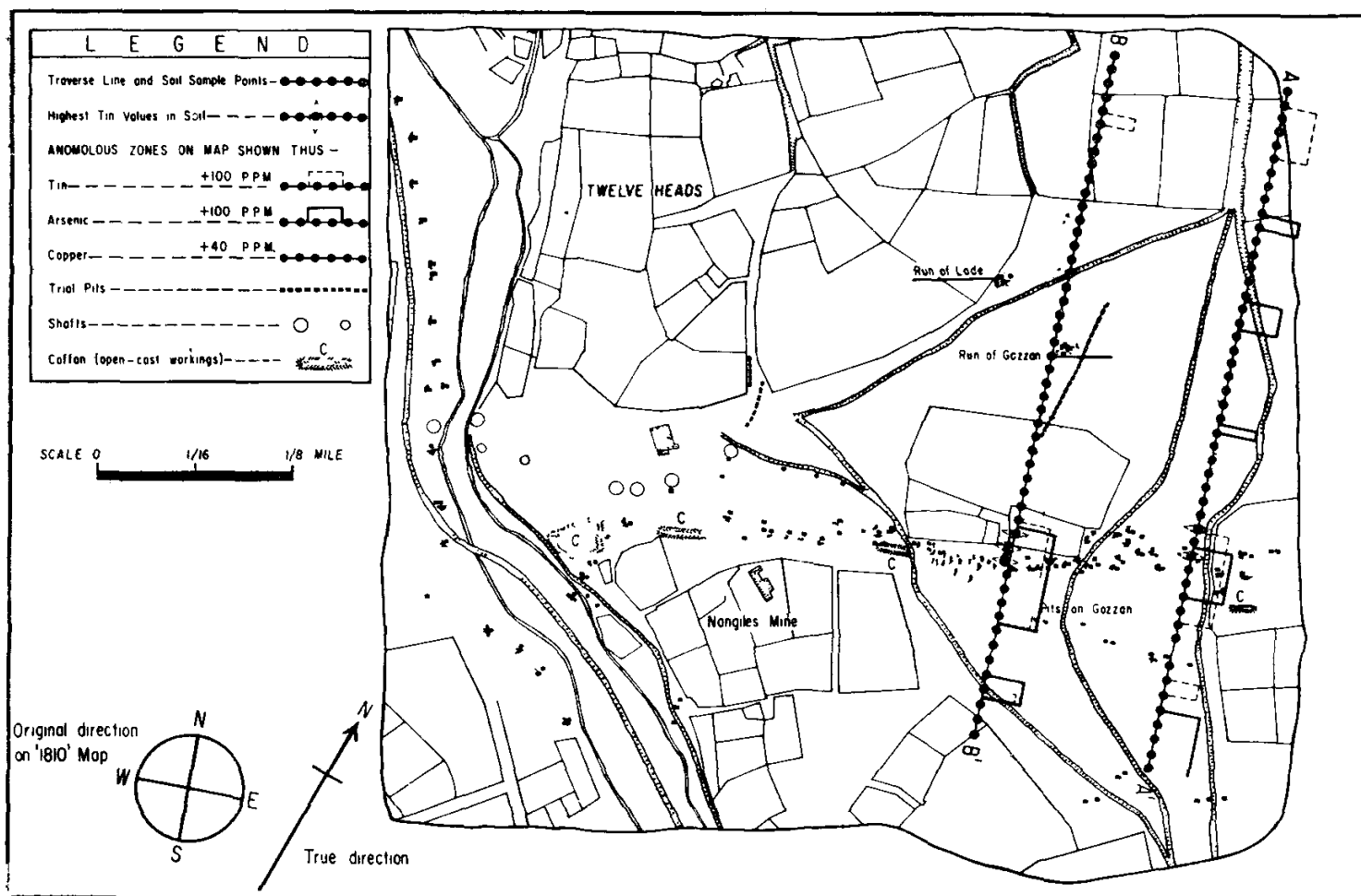
Для уменьшения затрат на поиски на восстановленных землях было изучено несколько незасыпанных инородным материалом поисковых шурфов и каналов. Полученные результаты характеризуются малой дисперсией содержания металлов, поэтому рудные зоны на таком участке можно очень эффективно проследить геохимическими методами (анализы почв), что хорошо видно на примере района рудника Нанджилес (неопубликованные данные Хоскинга и Рэдалла, 1968). В этом районе имеются многочисленные шурфы и каналы, которые пройдены еще в конце XVIII в. и начале XIX в. (они нанесены на карту, составленную примерно в 1810 г.). Позже эти выработки были завалены и стали незаметными. Они явно не мешают при прослеживании рудных зон, содержащих Sn, Cu, As и Zn (фиг. 3А и 3Б), геохимическими методами (анализы почв). Следует отметить, что если в прошлом поисковики должны были проходить шурфы и каналы по каждой рудной зоне, чтобы решить вопрос о ее рудоносности, то геохимические методы дают возможность сделать это без выполнения горных работ.

Фермеры улучшают свою землю в основном вспахиванием и внесением удобрений. Ни то, ни другое не мешает проведению геохимических поисков. Несколько лет назад на месторождении Касл-эн-Дайнес удалось отчетливо установить положение вольфрамитсодержащей рудной зоны, хотя содержания вольфрама определялись в пробах почвы, отобранных из горизонта В на глубине около 35 см от поверхности вспаханного поля [9]. Вспахивание, очевидно, нарушает только приповерхностную часть почвенного горизонта и вызывает весьма ограниченное горизонтальное перемещение.

Отсутствуют также основания и для предположения, согласно которому удобрения, внесенные в Корнуэлле в почву, могут стать источником заражения почвы металлами. В дру-



ФИГ. 3А. Содержание олова, меди и мышьяка во фракции —80 меш проб почвы из горизонта В, отобранных в окрестностях рудника Нанджилес, западный Корнуэлл. Пробы взяты через 15 м, топографическая основа современная.



ФИГ. 3Б. Положение указанных на фиг. 3А профилей на карте, составленной в 1810 г. AA' и BB' — линии профилей с участками отбора проб; ромбами показаны участки с наиболее высоким содержанием олова в почвах.

гих районах Англии используется для удобрения известь (добываемая с участков, содержащих свинцовую минерализацию), которая вызывает заражение почв свинцом. Однако и в Корнуэлле введение в почву фосфатов может способствовать переводу в нерастворимые соединения таких элементов, как медь и цинк, но этот вопрос не рассматривается в настоящей статье.

Наконец, фермеры применяют фунгициды, которые, безусловно, могут вызывать заметное заражение почвы металлами. С этой точки зрения особое внимание следует обратить на бордоскую жидкость, которая представляет собой медьсодержащий раствор, используемый против картофельных тлей, и на раствор каломели (хлористой ртути), которым смачивают корни молодых растений перед пересадкой, чтобы предотвратить их высыхание. Опасность таких работ для ничего не подозревающего геохимика не нуждается в дальнейших комментариях.

В прошлом фермеры использовали токсичные рудничные воды, которые иногда отводились по трубам на фермы для животных. Временами это имело катастрофические последствия. Так, несколько лет назад вода с высоким содержанием сурьмы, свинца и мышьяка из заброшенной шахты рудника Тревинник (рудное поле северо-восточного Корнуэлла) была подведена на ферму в питьевые корыта. Использование столь своеобразного источника было прекращено, когда погибла часть домашней птицы. Богатая металлами вода из такого источника могла бы за продолжительный период времени вызвать заражение участков почвы, на которые она стекала.

Наконец, если говорить о замене местных растений экономически выгодными перевезенными из других районов, то это также является особым типом заражения почвы и значительно затрудняет поиски месторождений полезных ископаемых, поскольку уничтожаются некоторые местные растения, указывающие на наличие залегающих вблизи поверхности рудных тел. Кроме того, заражением почв при удобрении фермеры частично понижают возможность обнаружить расположенные вблизи поверхности месторождения, поскольку растения над некоторыми месторождениями имеют физиологические аномалии, исчезающие при внесении удобрений. В настоящее время Корнуэлл может гордиться растением-индикатором, *Erica vagans*, присущим богатым магнием участкам.

Заражение, обусловленное другими отраслями промышленности. Другие отрасли промышленности, такие, как рыболовство, судостроение (в небольшом масштабе) и производ-

ство горного и другого оборудования, а также взрывчатых веществ, не вызывают существенного заражения почвы. Даже если наличие завода на рудном поле приводит к заражению, то почва на этой территории уже так нарушена и заражена при горных работах, как в районе Камборна, что проведение геохимических работ здесь не имеет смысла, возможно, кроме изучения материала отвалов. Иногда заводы находятся на бесперспективной в отношении поисков территории. Однако рост городов в пределах рудных полей обусловлен в основном развитием горнодобывающей промышленности, и поэтому значительные территории недоступны для геохимических поисков.

При постройке судна дно его обычно красят медьсодержащей краской, чтобы оно не обрастало водорослями. Но медь извлекается из этой краски очень медленно, да и судов на реках и в эстуариях не так уже много, поэтому заражение осадков медью, обусловленное судостроением и судоходством, незначительно. Кроме того, вряд ли отложения эстуариев в Корнуэлле когда-нибудь будут изучаться с точки зрения поисков коренных месторождений, хотя вполне возможно, что часть этих отложений необходимо заново исследовать для оценки их оловянности.

Заражение, обусловленное бытовой деятельностью. Хорошо известно, что бытовые стоки могут заметно загрязнять реки. Такие стоки для определенных районов, видимо, существенно не изменяются от одного участка к другому. В Англии они могут содержать значительное количество ионов меди и цинка, попадающих в стоки в растворенном и адсорбированном коллоидами состоянии из водопроводных кранов и других предметов домашнего обихода, содержащих эти элементы. К тому же значительное количество меди и других металлов наблюдается в сточных водах в виде металлоорганических комплексов, которые выделяются людьми и животными с экскрементами и мочой. Некоторое представление о содержании металлов, встречающихся в моче и сточных водах (частично из заброшенных рудников), можно получить из табл. II.

Распределение металлов бытовых сточных вод в естественных водотоках, видимо, очень сложное и зависит от многочисленных факторов, таких, как спуск сточных вод, природа и степень обработки последних перед их спуском в реки и др. Ясно, однако, что привнос из таких источников в реку приводит к появлению явно аномальных концентраций металлов в речных водах и осадках ниже поселений значительных размеров. В связи с этим интересно, что местами

Таблица II

Содержание Zn, Cu и Pb в утренней сточной воде одного из домов в Камборне (Корнуэлл) и в первой порции мочи двух его жильцов

	Zn		Cu		Pb	
	Концентрация, мкг/л	Общее количество, мкг	Концентрация, мкг/л	Общее количество, мкг	Концентрация, мкг/л	Общее количество, мкг
Субъект А	1500,0	234,0	1,5	0,2	54,0	8,4
Субъект Б	266,0	133,0	10,0	5,0	9,0	4,5
Сточная вода	86,9		12,5		10,0	

Примечание. Субъект А страдает склерозом [11].

ниже поселка Труро фракция —80 меш в речных отложениях содержит 400 млн⁻¹ меди и 600 млн⁻¹ цинка, а Труро находится в безрудном районе [10]!

В сельских районах вода из колодцев в деревнях и на фермах часто содержит аномально высокое количество цинка из-за обрыва оцинкованных ведер в колодцах, а в районе Каслэн-Дайнес, в центральном Корнуэлле, это явление настолько обычно, что для изучения естественного содержания тяжелых металлов в грунтовых водах можно с уверенностью использовать только воду из проточных источников [7].

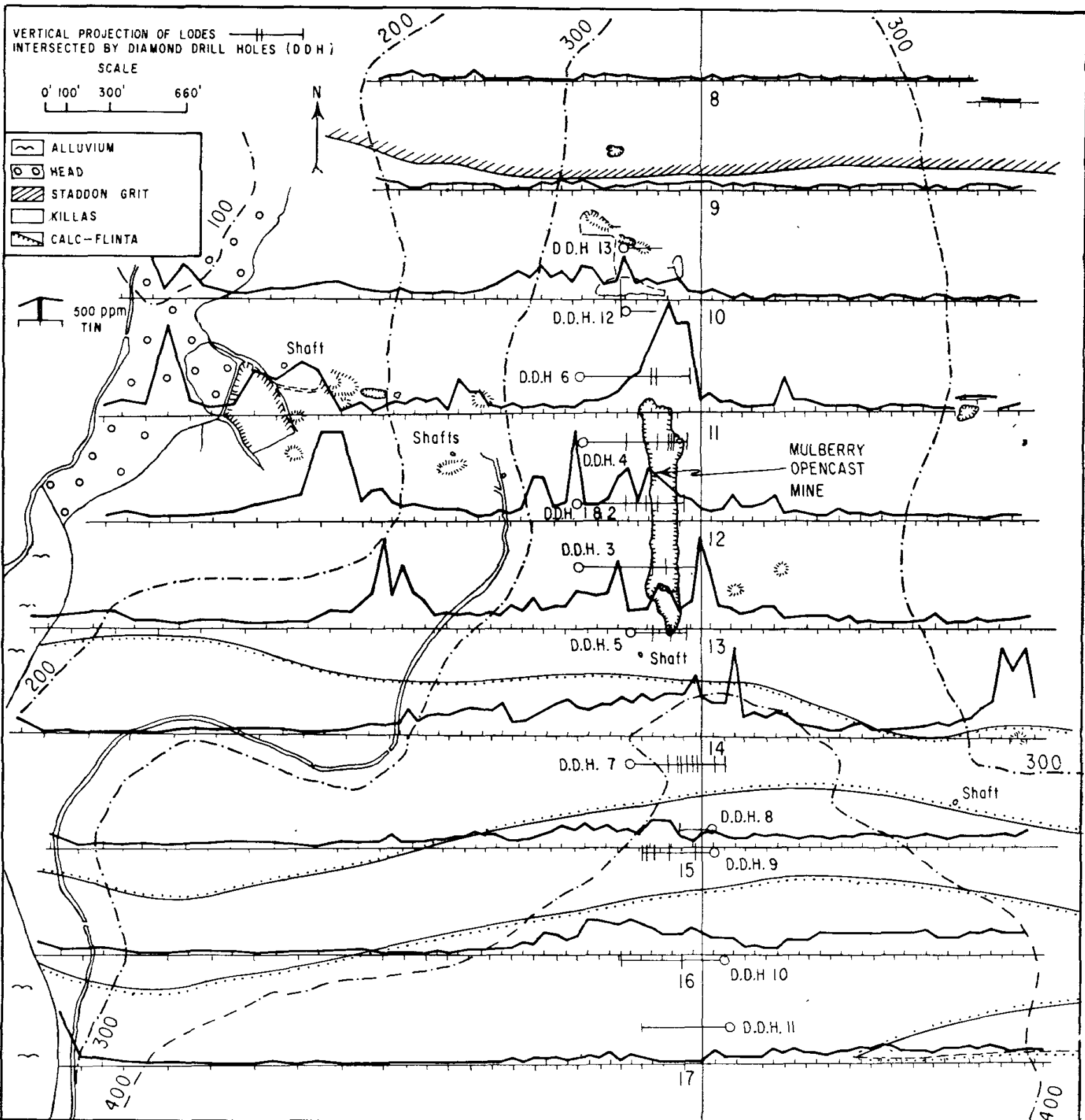
В реках вблизи поселков в Корнуэлле всегда обнаруживаются выброшенные за ненадобностью металлические предметы, но признаков их существенного влияния на содержание металлов в речных отложениях не установлено. Однако высокое содержание свинца в некоторых участках одного из притоков реки Хелфорд обусловлено тем, что в реку выброшено множество обломков глиняной посуды, покрытой свинцовой глазурью (Хоскинг, неопубликованные материалы).

УСЛОВИЯ ПРИМЕНЕНИЯ ГЕОХИМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ПРИ ПОИСКАХ РУДНЫХ ТЕЛ В КОРНУЭЛЛЕ

Если учесть все сказанное выше, то может показаться, что возможности применения геохимических методов при поисках рудных месторождений в Корнуэлле ограничены, и это действительно так. Однако положение отнюдь не столь мрачное, как представляется некоторым исследователям. Конечно, многие реки так заражены, что анализ вод и осадков в них вообще не поможет при поисках руд в пределах небольших площадей. Тем не менее, как уже указывалось выше, при помощи анализа речных

отложений на участке Карменеллис, на котором наблюдается местами значительное заражение этих отложений рудниками, отработывавшими россыпи, было установлено наличие материнских рудных зон. Таким образом, исследования, проведенные на участке Карменеллис [4], в Лендс-Энд [8], в поле сурьмяных месторождений на северо-востоке Корнуэлла [6] и в других районах, показали, что если пробы осадков из всех рек на площади около 160 км² проанализировать на соответствующие элементы и учесть заражение, обусловленное работой промышленности в прошлом и в настоящее время, то можно выделить участки, на которых аномальные концентрации металлов в дренажных системах, вероятно, вызваны естественными причинами. Таким путем были выявлены участки, представляющие определенный интерес в районе Лендс-Энд [8] и в указанном выше поле сурьмяных месторождений [6]. Подобно этому, после того как было установлено, что в осадках рек района Карменеллис наблюдается отрицательная корреляция между оловом и литием, проведены исследования на незараженном участке с низким содержанием лития, на котором были отобраны и проанализированы на олово пробы речных отложений и почв. В результате этих работ было установлено наличие ранее не известной жилы, содержащей, хотя и в небольшом количестве, касситерит (К. Х. Г. Хоскинг, Дж. А. Хоскинг и Томас, неопубликованные данные, 1964).

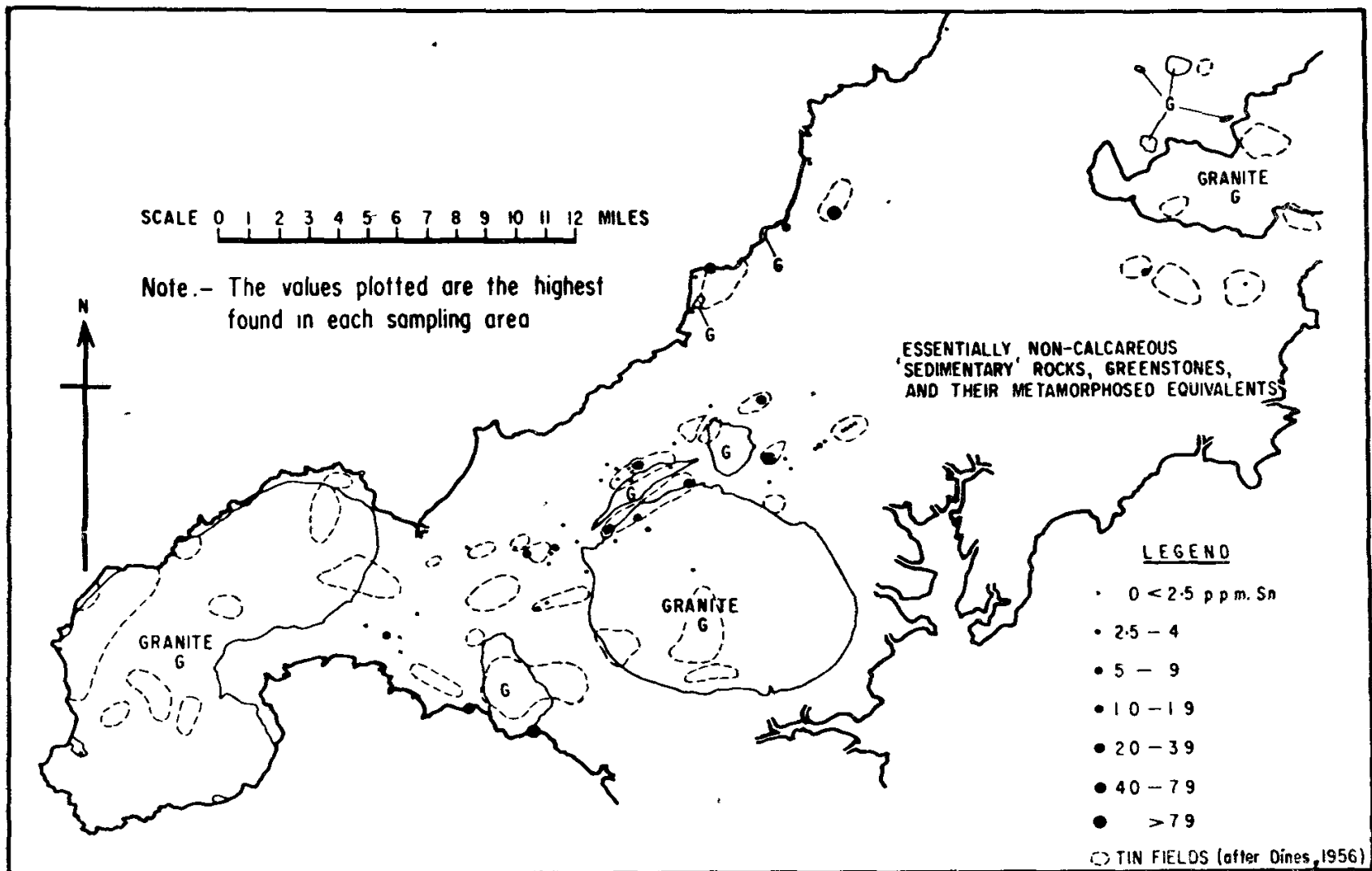
Было также показано, что благоразумное применение геохимических методов поисков, использующих анализ проб почвы, достойно внимания. Ранее, например, отмечалось, что находящиеся вблизи поверхности рудные зоны в районе Нанджилес успешно прослеживались геохимическим методом, даже если в районе ранее проводились интенсивные горные работы. Как ранее тоже указывалось, иногда заражение, обусловленное рудничными отвалами, столь



ФИГ. 4. Карта, составленная по результатам анализа на олово фракции —80 меш из проб почвы, отобранных при геохимических поисках в районе рудника Малберри, центральный Корнуэлл.
 Легенда сверху вниз: аллювий; наносы галечника; песчано-галечные отложения; вмещающие рудоносные тела породы; известковисто-кремнистые породы.

незначительно, что пробы незараженного почвенного горизонта В можно отобрать на расстоянии 6—9 м от отвалов. Это позволило проследить медьсодержащие рудные зоны в районе Уил-Алфред, одна из которых находилась на

расстоянии всего 10—15 м от небольшого отвала, содержащего тяжелые металлы [3]. В некоторых районах рудничные отвалы так разрушены, что они не мешают проследить по протиранию близкие к поверхности рудные зоны



ФИГ. 5. Содержание олова в дайках гранит-порфиров западного Корнуэлла, залегающих в бескальциевых осадочных породах, зеленокаменных породах и их метаморфизованных аналогах. На карту нанесены максимальные для опробованных участков содержания.

или серии параллельных зон путем определения содержания металлов в почве. На руднике Малберри в районе Ланивет, где оловоносный штокверк разрабатывался открытым способом, простирание жильной серии прослежено геохимическими методами, а именно анализом почв фракции —80 меш на Sn, As, Cu, W, Zn и др., поскольку расстояние между шурфами очень большое. Последующее бурение показало, что распределение олова в почве очень точно отражает его распределение в залегающих ниже оловоносных жилах (Хоскинг и Уотер, неопубликованные материалы). Как показано на фиг. 4, содержание олова в почве к западу от шурфа местами в этом районе гораздо больше, чем над самим рудным телом. Столь высокая концентрация олова вызвана заражением, которое произошло в результате сильного нарушения почвенного слоя во время горных работ и обогащения руд. В районе Касл-эн-Дайнес анализ проб почвы на вольфрам дал возможность проследить между подземными выработками рудную зону Мейн-Лоуд, залегающую вблизи поверхности, и обнаружить зону с аномально

высоким содержанием вольфрама к западу от первой. Открытая зона затем была пересечена кварцшлагом, она оказалась системой мелких вольфрамитсодержащих жил [9]. Автору статьи известны и другие примеры успешного применения в Корнуэлле геохимических методов поисков, использующих анализ проб почвы, но результаты этих работ не публикуются горнодобывающими компаниями и, следовательно, подробно о них ничего не известно.

Естественно, при использовании геохимических методов поисков, основанных на анализе проб коренных пород, возможность заражения в Корнуэлле не больше, чем обычно при геохимических работах. Наиболее важные работы по анализу проб коренных пород включают исследование керн скважин и шлама из глубоких шпуров, образцов из подземных выработок, особенно жильного материала, и образцов из рудничных отвалов. Хотя было проведено несколько исследований, чтобы установить распределение рудного металла в обнажениях гранитов и других пород, результаты этих исследований не дают основания утверждать, что

такие исследования вообще помогают при поисках рудных месторождений в Корнуэлле. Видимо, наиболее интересные результаты дал анализ нескольких сотен проб из даек гранит-порфиоров. Было установлено, что, если материал содержит более 10 млн^{-1} олова, около таких гранитов можно встретить оловосодержащие жилы. Однако как пробы, отобранные буквально в нескольких сантиметрах от значительных рудных зон, так и пробы, отобранные в нескольких километрах от них, могут содержать лишь несколько миллионных долей олова (фиг. 5 и неопубликованные материалы Хоскинга и Ли).

Несколько лет назад, при возрождении интереса к оловоносности Корнуэлла, шлам из скважин анализировался колориметрическим методом на олово. Этот метод весьма успешно применялся для локализации зон, представляющих интерес; с его помощью дешево и быстро определяется содержание олова, что невозможно сделать визуально, даже при большом опыте изучения месторождений Корнуэлла, поскольку рудная зона мощностью несколько метров имеет промышленное значение даже при довольно низком (около 1%) содержании касситерита. Однако извлекать шлам на этой стадии исследований трудно. По этой и другим причинам в настоящее время, чтобы установить оловоносные пересечения, рекомендуется систематически исследовать керн автоматическим олово-анализатором.

Несколько лет назад при изучении керна скважин рудника Саут-Крофти было установлено, что, по крайней мере иногда, наблюдается увеличение густоты ранее образовавшихся минерализованных трещин и повышение содержания в них олова по направлению к рудным зонам, хотя для олова эта закономерность несколько неустойчива (Хоскинг и Барн, неопубликованные данные). Однако эти интересные данные, кажется, еще не используются при поисках в той степени, какой они заслуживают. Все-таки на руднике Саут-Крофти анализ шлама экспрессным колориметрическим методом на олово, вольфрам и мышьяк позволил легко и быстро составить карты распределения этих металлов (Хоскинг и Барн, неопубликованные данные). Шлам при этом отбирался из серии глубоких шпуров, пробуренных на сетчатых жилах, которые содержат касситерит, вольфрамит, арсенопирит, и другие рудные минералы.

Поскольку предварительные исследования автора на руднике Бералт-Тин-энд-Вольфрам, Португалия, показали, что содержание вольфрама в пробах «чистого» кварца из рудных тел значительно выше, чем в его пробах из безруд-

ных жил, подобное исследование было проведено и на руднике Дживор. При этом в квершлаг было опробовано около 50 жил, а затем пробы проанализированы экспрессным колориметрическим методом на олово, медь, цинк и мышьяк. Результаты оказались неожиданными и эффективными. Они показали, что жилы из оловоносных рудных зон, имеющие интерес для промышленности, характеризуются явно аномальными концентрациями меди [2]. Дальнейшая работа в этом направлении может облегчить подземное изучение рудных зон в Корнуэлле.

Наконец, показано, что геохимические исследования, использующие экспрессный количественный анализ проб из ранее почти недокументированных рудников, могут дать поисковикам ценный материал. При таких исследованиях отвал небольшого рудника можно рассматривать как эквивалент керна скважин, но материалом верхних горизонтов сложено основание отвала, а материалом нижних горизонтов — верхний его слой. Быстрый анализ минерального состава жильного материала отвалов рудников в районе Нанджилес — Уил-Джейн, по которым данных очень мало, показал, что отдельные рудные зоны явно оловоносны и, следовательно, могут иметь значение при поисках олова. Кроме того, хотя изучаемый при таком исследовании материал был взят не из коренного залегания, а отобран с различных уровней отвалов, все-таки можно составить некоторое представление о глубине залегания этого материала (Хоскинг, неопубликованный материал).

На руднике Динг-Донг (район Лендс-Энд) касситерит извлекался подземным способом из серии сближенных жил в гранитах. Считалось, что приконтактные вмещающие породы, по всей вероятности, на значительном расстоянии от жилы содержат ощутимое количество касситерита, поэтому месторождение можно отрабатывать открытым способом. Экспрессный колориметрический метод проб приконтактных пород, отобранных из отвалов, показал исключительно низкое содержание олова в породах, часто меньше 20 млн^{-1} , и, следовательно, ни о какой отработке рудника открытым способом в данном случае говорить не приходится. Это заключение подтвердилось впоследствии при бурении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Barton D. B., A History of Tin Mining and Smelting in Cornwall, D. Bradford Barton, Ltd., Truro, England, 1967.
2. Garnett R. H. T., The Underground Pursuit and Development of Tin Lodes, 139—162, of A Technical

- Conference on Tin, International Tin Council, London, 1967.
3. *Hosking K. F. G.*, Applied Geochemistry, Studies in Cornwall, Trans. Roy. Geol. Soc. Cornwall, 19, 52—83, 1955—1956.
 4. *Hosking K. F. G.*, The Relation Between Primary Tin Deposits and Granitic Rocks, 267—306 of A Technical Conference on Tin, International Tin Council, London, 1967.
 5. *Hosking K. F. G.*, *Curtis P. G.*, Further Applied Geochemical Studies in the Vicinity of Castle-Dinas mine, Mid-Cornwall, Camborne School of Mines Mag., 61, 5—12, 1961.
 6. *Hosking K. F. G.*, *Davies W.*, *Ong P.*, A Reconnaissance Survey of the Distribution of Antimony and Certain Related Metals in North Cornwall, Camborne School of Mines Mag., 63, 24—37, 1963.
 7. *Hosking K. F. G.*, *Derici S.*, *Lwin M. H.*, The Heavy-Metal Content of Waters in Mid-Cornwall, Mine and Qy. Engng., 490—493, 1962.
 8. *Hosking K. F. G.*, *Hosking J. A.*, *Thomas G. S.*, *Usman H.*, *Pisarski J. B.*, The Distribution of Tin Copper, Zinc, Beryllium, and Phosphorus in the Stream Sediments of the Land's End Peninsula, Cornwall, Camborne School of Mines Mag., 64, 15—32, 1964.
 9. *Hosking K. F. G.*, *Montambeault G.*, Geochemical Prospecting for Tungsten in the Vicinity of Castle-Dinas Mine, Mine and Qy. Engng., 22, 423—427, 1956.
 10. *Hosking K. F. G.*, *Obial R.*, A Preliminary Study of the Distribution of Certain Metals of Economic Interest in the Sediments and Waters of the Carrick Roads (West Cornwall) and of its «Feeder» Rivers, Camborne School of Mines Mag., 66, 17—37, 1966.
 11. *Hosking K. F. G.*, *Lee J. Y.*, *Olinze S. K.*, *Mitchell D.*, *Mugenyi Y. H. K.*, A Reconnaissance Survey of the Distribution of Tin, Copper, Zinc and Arsenic in the Sediments of the Rivers to the South of the St. Austell Granite Mass, Cornwall, Camborne School of Mines Mag., 65, 30—42, 1965.
 12. *Hosking K. F. G.*, *Ong P. M.*, The Distribution of Tin and Certain Other «Heavy» Metals in the Superficial Portions of the Gwithian/Hayle Beach of West Cornwall, Trans. Roy. Geol. Soc. Cornwall, 19, 351—390, 1963—1964.
 13. *Hosking K. F. G.*, *Pisarski J. B.*, Geochemical Surveys in Cornwall, Mining Mag., 179—181, 1965.
 14. *Jenkin A. K. H.*, The Cornish Miner, Allen and Unwin, Ltd., London, 1927.
 15. *Stephens F. J.*, Alluvial Deposits of the Lower Portion of the Red River Valley, near Camborne, Trans. Roy. Geol. Soc. Cornwall, 12, 324—335, 1899.
 16. *Thomas W.*, Losses in the Treatment of Cornish Tin Ores, Trans. Corn. Inst. Min. Mech. Metall. Engrs., 1, 56—74, 1913.

МОРСКИЕ ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ПОИСКИ — НАСТОЯЩИЕ И БУДУЩИЕ

Ф. Р. Сигел

Университет им. Джорджа
Вашингтона, Вашингтон

Ознакомившись с материалами последних международных геохимических симпозиумов и секций Международного геологического конгресса, посвященных геохимии, начиная с 1956 г., автор настоящей статьи обнаружил бросающееся в глаза отсутствие работ по геохимическим поискам в морской среде. Экономический потенциал, социальное и в меньшей степени политическое значение продуктов моря находится сейчас на той стадии, когда можно предположить, что существующие границы геохимических поисков (обычно сводящихся к поискам на континентах) могут быть расширены. С помощью прикладной геохимии можно охватить геохимическими поисками моря, используя более современную технику исследований и развивая новые методы.

Экономическая оценка некоторых продуктов, извлекаемых из морской воды, добываемых на песчаных отмелях, морском дне и из подстилающих дно морей горных пород, представлена в табл. I. В обеих группах, приведенных по данным двух различных литературных источников, очевидны расхождения в цифрах по

каждому из продуктов, однако важны не сами по себе цифры, а порядок их величин. Для 14 продуктов, представленных в группе А, 7,9% их общей стоимости было получено при разработках на участках, удаленных (континентальный шельф) от берега (исключая прибрежные пески); стоимость этих 14 продуктов превысила 4170 млн. долл. В группе Б стоимость минерального сырья, которое было извлечено из морской среды в течение года, составляет сумму 8000 млн. долл. Очевидно, что на эти общие цифры оказывает влияние добыча нефти и газа, 16—20% которых получают из скважин, удаленных от берега.

Необходимость широкого развертывания геохимических поисков в морях становится еще более очевидной, если принять во внимание работу Брукса и Ллойда [1] по экономике минерального сырья и океанам и работу Маккелви [10] о минеральном потенциале затопленных частей континентов. Если на график нанести мировые запасы марганца рядом с нарастающим мировым потреблением этого металла, обе проекции пересекутся где-то около 1997 г.

Таблица I

Стоимость продуктов, извлекаемых из морской воды и морского дна

Группа А ¹	Годовая стоимость продуктов, млн. долл.	В % от общего мирового производства	Группа Б ²	Годовая стоимость продуктов в млн. долл.	В % от общего мирового производства
Нефть	3900	15,0	Нефть и газ	6100	16
Песок и гравий	150	10,8	Ракушечник	30	80
Сера	37	16,6	Сера	26	8
Олово	24	5,2	Олово	24	4
Алмазы	4	1,4	Алмазы	9	Мало
Золото	0,5	Мало	Тяжелые минералы	13	13
Платина	0,5	Мало			
Ильменит	0,5	Мало			
Рутил	0,5	Мало			
Циркон	0,5	Мало			
Монацит	0,5	Мало			
Драгоценные кораллы	2	100			
Уголь	35	0,2	Соль	173	23
Железная руда	17	0,4	Магний	75	61
			Вода	51	59
			Бром	45	70
			Соединения магния	41	6
			Тяжелая вода	27	20
			Другие	1	

¹ «Кемикэл энд энджиниринг», 26 мая, 1969 г.² «Андерси технолоджи», январь 1970 г.

(фиг. 1, а). Следовательно, к 1997 г. потребление марганца будет равно мировым запасам (современным). Положение США хуже большинства других стран мира, так как растущий спрос США уже сейчас превышает имеющиеся запасы марганца.

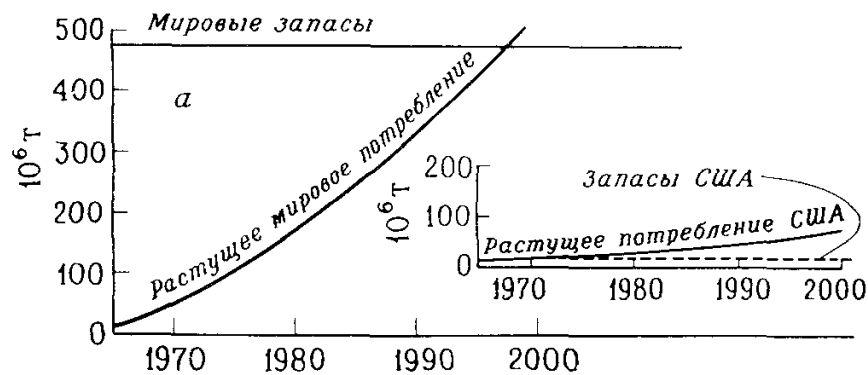
По никелю цифры почти такие же, т. е. растущие мировые потребности в никеле достигнут его современных запасов около 1997 г. Что касается США, то уже к 1971 г. их растущие потребности должны были сравняться с имеющимися запасами (фиг. 1, б). Маккелви [10] опубликовал данные, которые, по его мнению, представляют возможные для извлечения запасы, а также достижимые или близкие к достижимым количества нескольких элементов в затопленных частях континентов. Он считает, что марганцевые конкреции (содержащие никель, кобальт, медь и другие металлы), распространенные на значительных площадях на дне океана, содержат более $1 \cdot 10^9$ т руды (фиг. 1, в), и эту руду он классифицирует как близкую к достижимой (продукты, которые извлекаются по ценам более чем в 1,5 раза выше современных, но которые найдут свое применение и ценность в будущем). Таблица II, по Меро [12], дает детальную оценку запасов металлов в марганцевых конкрециях Тихого океа-

на. Запасы отдельных элементов, таких, как титан, ванадий, марганец, никель, кобальт, медь и др., настолько велики, что их вполне достаточно, чтобы не ограничивать потребление на современном уровне. Доступность этих запасов, очевидно, зависит от экономичности добычи руды и процессов извлечения металла, от мировых цен не на один, а на группу элементов, которые можно извлекать из марганцевых конкреций.

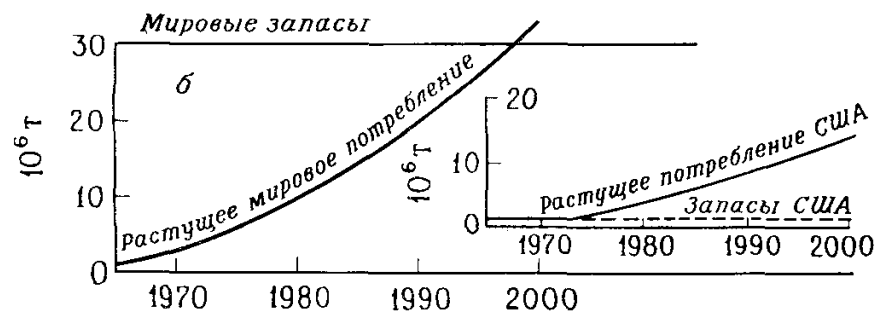
На фиг. 1 отражены также сравнительные данные по сере (фиг. 1, г, д) и фосфору (фиг. 1, е, ж), взятые у Брукса и Ллойда [1] и Маккелви [10]. Таким образом, можно считать, что поле деятельности для широкого развертывания геологического и геохимического картирования и поисков в океанах уже подготовлено.

В таблице III, по Меро [13], указаны типы месторождений и их местоположение в морской среде. Автор настоящей статьи несколько изменил эту таблицу, добавив следующие продукты, представляющие интерес: драгоценный коралл, извлекаемую питьевую воду, тяжелую воду (необходимую для развития атомной техники в целях мирного использования), а также металлоносные горячие рассолы и их осадки.

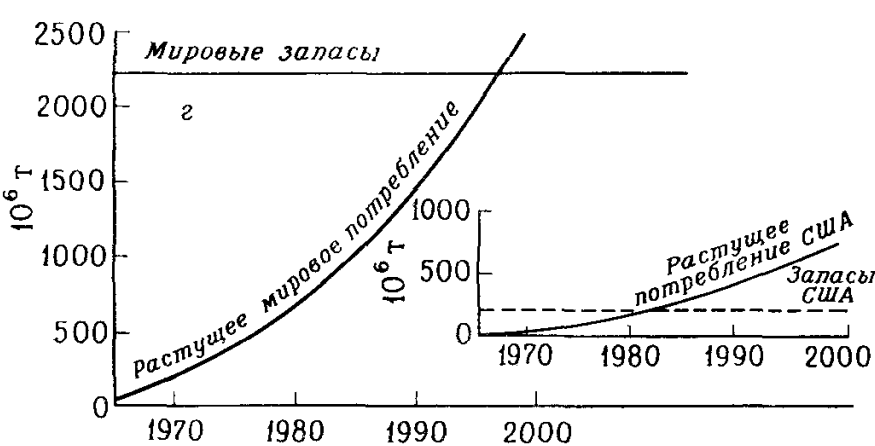
Марганец
(Содержание элемента)



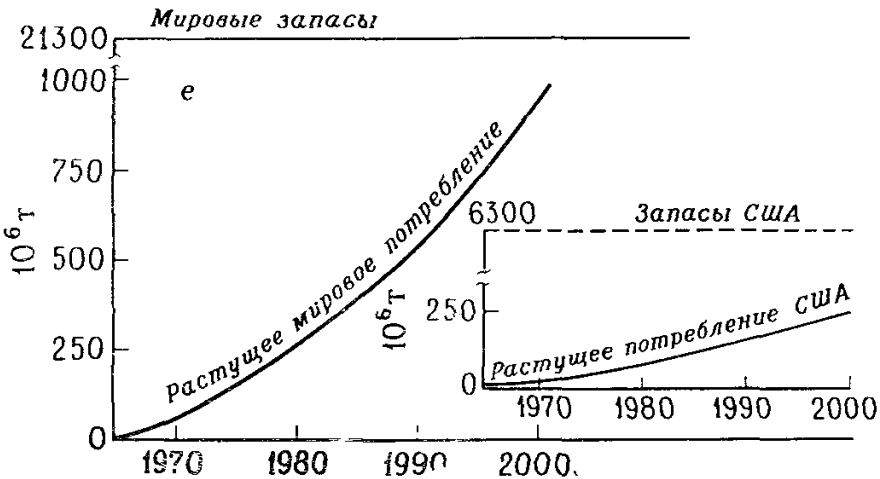
Никель
(Содержание элемента)



Сера
(Содержание элемента)



Фосфор
(Содержание элемента)



	Известные			Не обнаруженные
	Достоверные	Вероятные	Возможные	
Извлекаемые				
Достижимые				
				Марганцевые конкреции (с Cu, Co Ni) > 10 ⁹ т
в				
Извлекаемые	Известные			Не обнаруженные
	Достоверные	Вероятные	Возможные	
Достижимые	Сера в заливе Солт Доум 37 · 10 ⁹ т			Сера в заливе Солт Доум 40-50 · 10 ⁶ т Сера в Калифорнийском заливе 40 · 10 ⁶ т
	Другие возможные источники гипса и сульфидов с большими запасами			
д				
Извлекаемые	Известные			Не обнаруженные
	Достоверные	Вероятные	Возможные	
Достижимые	Фосфорит = 100 · 10 ⁶ т			> 10 ⁸ т
	> 10 ⁹ т			> 10 ⁹ т
ж				

ФИГ. 1, а, 1, б, 1, в и 1, г. Соотношение роста мирового спроса на марганец, никель, серу и фосфор и их мировых запасов [1].

ФИГ. 1, в, 1, д и 1, ж. Оценка потенциальных запасов прибрежных частей континентов на марганцевые конкреции, серу и фосфор [9].

Таблица II

Оценка запасов металлов в марганцевых конкрециях Тихого океана [12]

Элемент	Запасы в конкрециях, млрд. т	Запасы в конкрециях по норме потребления 1964 г., годы	Приблизительные мировые запасы на континентах, годы	Норма потребления США в 1964 г., млн. т на год	Норма накопления в конкрециях, млн. т на год	Норма накопления, деленная на норму потребления в США
Mg	25 000	600 000	1	0,0400	0,18000	4,500
Al	43 000	20 000	100	2,0000	0,30000	0,150
Ti	9 900	2 000 000	1	0,3000	0,06900	0,230
V	800	400 000	1	0,0020	0,00560	2,800
Mn	358 000	400 000	100	0,8000	2,50000	2,800
Fe	207 000	2 000	500	100,0000	1,40000	0,010
Co	5 200	200 000	40	0,0080	0,03600	4,500
Ni	14 700	150 000	100	0,1100	0,10200	1,000
Cu	7 900	6 000	40	1,2000	0,05500	0,050
Zn	700	1 000	100	0,9000	0,00480	0,005
Ga	15	150 000	—	0,0001	0,00010	1,000
Zr	930	100 000	100	0,0013	0,00650	5,000
Mo	770	30 000	500	0,0250	0,00540	0,200
Ag	1	100	100	0,0060	0,00003	0,005
Pb	1 300	1 000	40	1,0000	0,00900	0,009

¹ Современные запасы значительны по сравнению с современным уровнем потребления.

Значительные средства вкладываются в морские научные программы многими странами мира. В качестве примера можно привести данные по программам морских научных исследований в США. В течение 1969 финансового года правительство истратило на эти цели около 463 млн. долл. На 1971 финансовый год расходы по бюджету были определены в 537,2 млн. долл., но из этой суммы только около 9,2 млн. долл. (менее 1,7% от общей суммы) предназначалось на исследования непосредственно в районах поисков рудных месторождений.

Ингерсон [8] писал, что геохимические поиски нефти использовались по крайней мере четырьмя основными компаниями в Мексиканском заливе, а также успешно применялись на Северном море и в Габоне. Глубоководные исследования получили толчок в своем развитии, когда было обнаружено, что нефть связана с глубоководными осадками и антиклинальными поднятиями Мексиканского залива (по данным, полученным во время работ Челленджера).

Вероятно, наибольшую работу по оценке потенциала моря в отношении многих важных продуктов уже провела и будет продолжать проводить Геологическая служба США. Например, в 1970 г. появилось второе издание (первое издание в 1969 г.) предварительных карт мировых подводных запасов минерального сырья, составленных Маккелви и Уангом. Эта специальная группа карт касалась нефти, солей, минерального сырья морского дна и прибрежных отложений. В 1969 г. Холмс писал о потен-

циальных возможностях моря и приводил примеры геохимических карт, очерчивающих процент свободного титана в пробах со дна Мексиканского залива, с глубиной отбора проб со дна моря в среднем 10 см. Была представлена также аналогичная карта, отражающая содержание циркония в донных пробах, и готовятся другие подобные карты (Холмс, личное сообщение). Данные Холмса за 1969 г. свидетельствуют об очень большом масштабе предварительных исследований. В северной части Мексиканского залива с площади 275 000 кв. км было взято около 1400 проб. Этот масштаб можно считать удовлетворительным для предварительной мелкомасштабной съемки, но в будущем рекогносцировку следует проводить более детально, по крайней мере так, как это было сделано Стоуном [19] на площади 640 кв. км на побережье Южной Каролины, где в среднем отбиралась одна проба на 10—25 кв. км. Потенциальные запасы руд на глубине могут быть определены по керну буровых скважин или непосредственно на месте с помощью разрабатываемой сейчас новой техники. При оценке минеральных отложений континентальных шельфов или более глубоких частей океана должны быть очевидны два обстоятельства. Во-первых, поверхностные пробы ничего не говорят нам или в лучшем случае говорят мало о том, что находится на глубине, поэтому необходим керн, а бурение стоит очень дорого. Во-вторых, некоторые пробы, отобраны ли они с 10 см глубины донного осадка или из керна, полученного

Таблица III

Минеральные месторождения и их местонахождение в морской среде

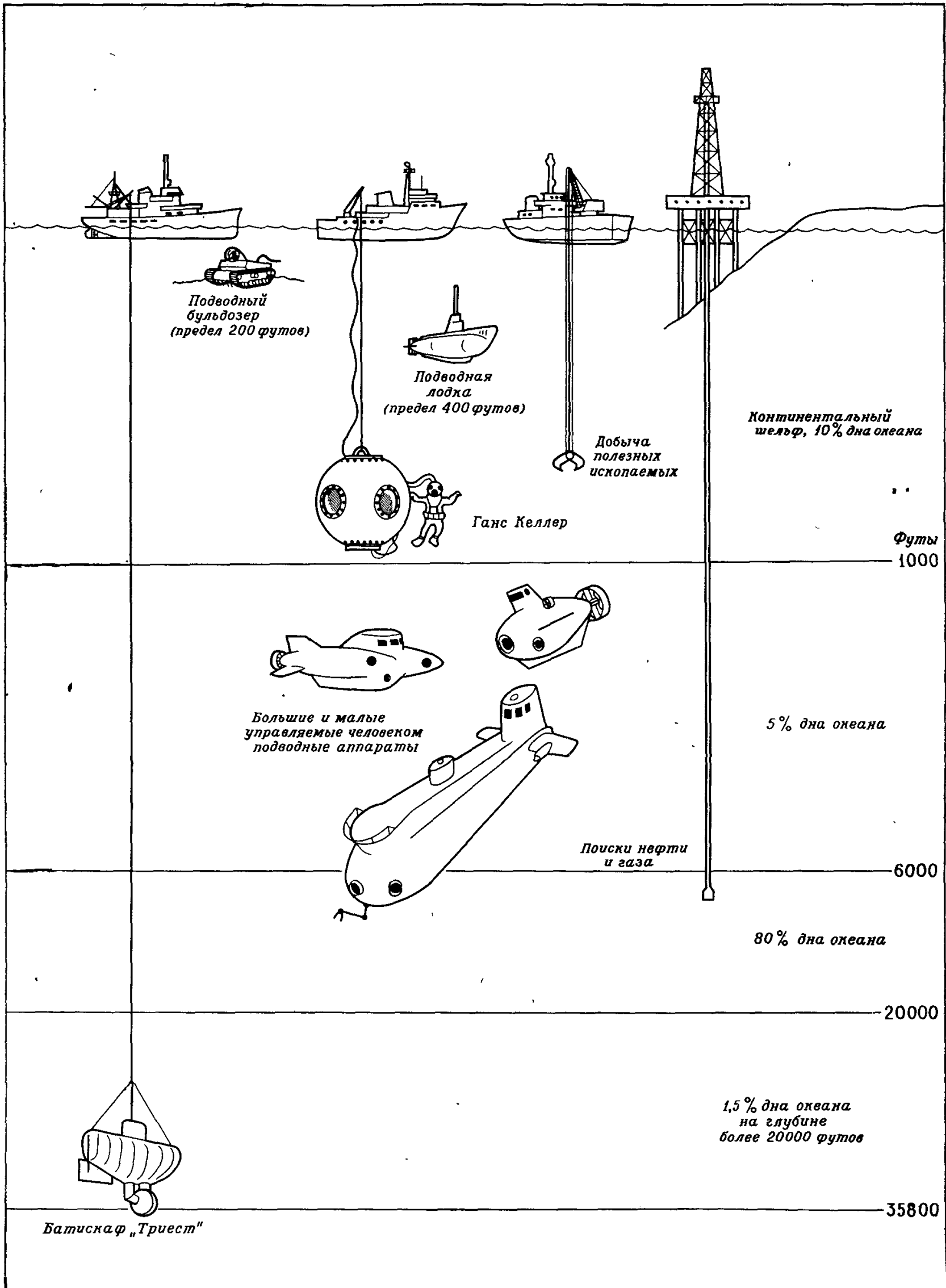
Зона	Продукты, представляющие интерес
Песчаные отмели	Россыпи золота, платины, алмазов, магнетита, ильменита, циркона, рутила, колумбита, хромита, касситерита, шеелита, вольфрамита, монацита, кварца, карбоната кальция, песка и гравия
Континентальные шельфы	Известковые сланцы, драгоценный коралл, фосфорит, глауконит, конкреции сульфата бария, песок и гравий; россыпи в затопленных долинах рек касситерита, платины, золота и других минералов
Горные породы на дне морей	Нефть, газ, сера, соль, уголь, железная руда и, возможно, другие минеральные отложения в жилах и других формах, как на суше
Морская вода	Обычная соль, металлический магний, соединения магния, бром, поташ, сода, гипс, опресненная вода, тяжелая вода и, возможно, сера, стронций и бор. В морской воде найдено большинство других элементов. Морская вода является потенциальным источником урана, молибдена и других элементов, технология извлечения которых уже разрабатывается
Морское дно на глубине	Конкреции марганца как источник марганца, железа, никеля, кобальта, меди, молибдена, ванадия и, возможно, некоторых других металлов. Горячие рассолы и связанные с ними отложения как источник золота, серебра, меди, цинка, свинца и, возможно, некоторых других металлов. Животные остатки как возможный источник фосфатов, а также олова, свинца, серебра и никеля. Глины для использования в строительстве и, возможно, также для получения глинозема, меди, кобальта, никеля и других металлов. Известняковые илы как цементное сырье и другие виды применения карбоната кальция. Кремниевые илы как кремнезем и диатомит. Цеолиты как источник поташа

с глубины нескольких метров, представляют очень ограниченную площадь или объем для исследования. Ввиду того что многие металлоносные морские отложения представляют собой рассеянную руду, желательно брать пробы большего объема, по возможности с большей

площади и глубины. Когда пробы доставлены на берег в лабораторию и в них обнаружено что-либо, представляющее промышленный интерес, судно должно вернуться в море для детального опробования. С точки зрения стоимости это убыточно. Процесс становится более эффективным, если химическая или геохимическая лаборатория будет непосредственно на корабле и она будет использовать мокрый химический анализ, колориметрию и атомно-абсорбционную спектрометрию. Частью аналитического оборудования на борту корабля скоро должна стать эмиссионная спектрометрия прямого прочтения. Однако каждый из этих методов, хотя они и могут дать точные данные об элементном составе проб, требуют предварительной обработки материала. Время на корабле ограничено, в связи с чем приходится отказываться от таких методов. Следовательно, ученые должны разработать быстрый и точный геохимический анализ, не требующий подготовки пробы и возможно более представительный для проб большого объема с большой площади, или это должно быть непрерывное производство анализов систематически меняющихся проб с большой площади.

Деффейс [2] сообщил о разработке электронной регистрации макропроб для быстрого химического анализа глубоководных проб керна на борту корабля. Он привел результаты анализа на кальций, железо и кремний. Прибор, разработанный Деффейсом, не требует вакуумной камеры и дает анализ площади 1 кв. см. Метод основан на измерении K_{α} -лучевых линий, образующихся в результате бомбардировки пробы с использованием β -эмиссии из ^{63}Ni источника. Хотя Деффейс считал, что анализируемый керн не требует предварительной подготовки, последующие работы показали, что анализируемая поверхность должна быть очень гладкой, а кроме того, необходимо принять меры против вращения керна в процессе анализа. Сейчас этот метод дает качественные определения, однако необходимость геохимических анализов и наблюдений *in situ* все еще существует.

Фиг. 2 взята из сообщения Шитса [18] на симпозиуме по морским наукам и промышленному потенциалу морей. На ней показана эволюция аппаратов, работающих под водой для разведки и эксплуатации. Эти аппараты могут работать на глубине до 2000 м. Сейчас это считается практическим пределом на ближайшее будущее для разведки и эксплуатации газа и нефти и дает возможность исследовать около 15% морского дна. Имея такие приспособления, можно наблюдать, непосредственно фотогра-

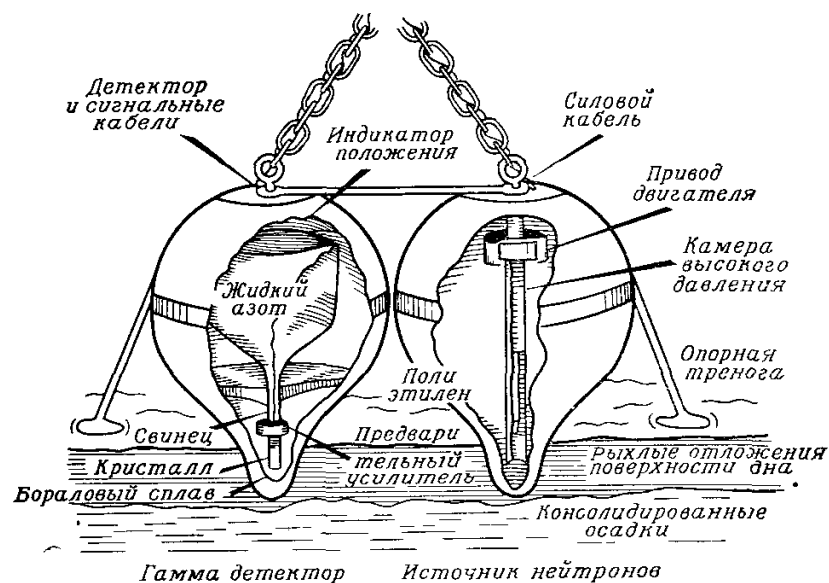


ФИГ. 2. Промышленное использование моря [18].

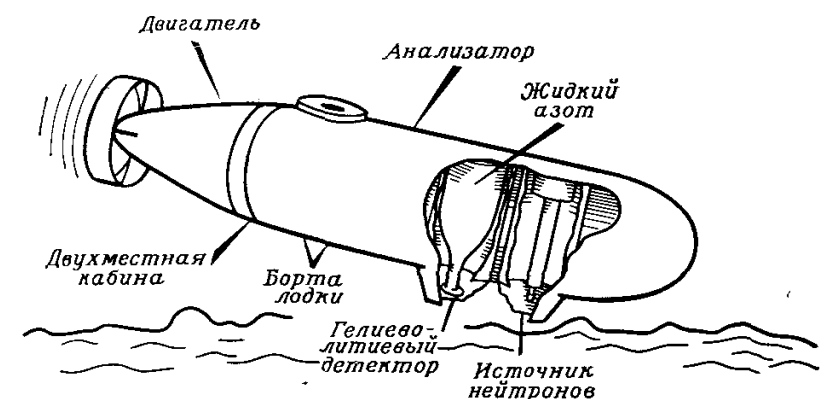
фировать и передавать изображение окружающей среды по телевидению на корабль.

Компания «Проспектор» установила более 30 тыс. станций в океанах и производит опробование и телевизионную съемку опробуемых точек. Однако эти косвенные наблюдения не могут заменить исследований, проводимых человеком на месте, который может маневрировать и перемещать подводные приспособления на более интересные участки. Сооружается множество глубоководных кораблей, оборудованных манипулирующими руками-захватами, позволяющими ученому отбирать наиболее интересные пробы и доставлять их на поверхность для анализа. Здесь опять возникает проблема поднятия пробы на поверхность для анализа.

Эта проблема может быть разрешена путем непрерывного совершенствования техники тепловой нейтронной активации и интерпретации полученного гамма-спектра. Сенфетл [17] сообщал об успехе активационного анализа, применяемого при исследовании минералов на



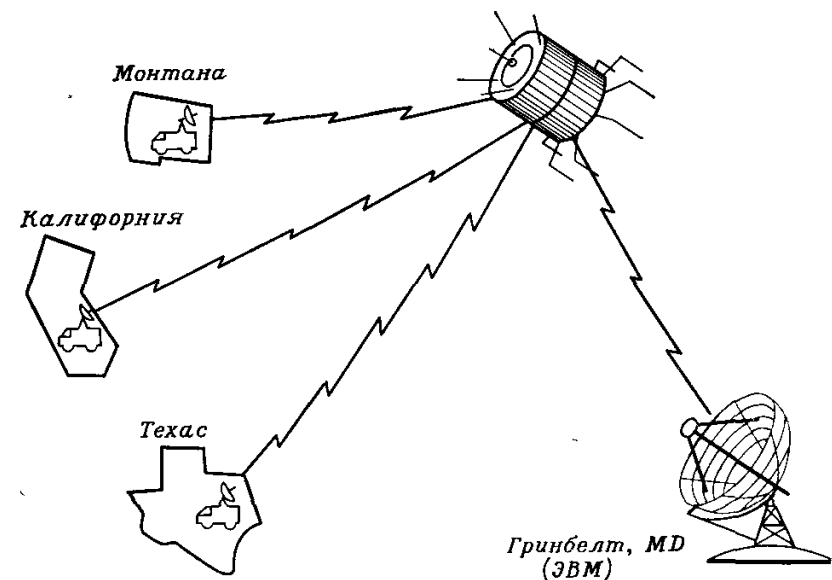
ФИГ. 3а. Общая схема тепловой нейтронной активации и захвата гамма-детектором для работы с основного корабля [14].



ФИГ. 3б. Зарисовки подводной лодки, выполняющей исследования дна океана с помощью аппаратуры, показанной на фиг. 3а.

земной поверхности [14, 7] в буровых скважинах [9] и в морской среде [15, 16]. Анализ захвата гамма-спектра после активации пробы ^{252}Cf имел заметный успех для ряда элементов (хлор, золото, марганец, ртуть и др.). Сенфетл (личное сообщение, 1970 г.) отмечал, что никель легко определяется под покровом осадков мощностью 140 см. Он используется в системах, применяемых *in situ* (фиг. 3а, 3б и 3в) при активации проб с большой площади, расшифровке захвата гамма-излучения с помощью Ge-Li детектора и использовании ЭВМ для воспроизводства данных и последующего картирования. Сенфетл [17] предложил воспользоваться спутником для передачи необработанного спектра с действующих полевых станций на ЭВМ. При последних испытаниях весь спектр передавали по телефону на компьютер менее чем за 30 с; меньше чем через 5 мин полевая исследовательская партия получала по телетайпу сведения о содержании элементов. Здесь совершается очевидная эволюция от ускоренного полевого активационного анализа на серебро в наземной среде к ^{252}Cf -активационной методике для поверхностных и главным образом морских (геохимических) поисков.

Одной из основных проблем успешного ведения морских геохимических поисков является задача локализации, и, если объект определен как промышленный, особенно важно установить участки детальных исследований. Их можно наиболее точно зафиксировать с помощью спутника, что особенно удобно для масштаба 1 : 500 000, или 1 м на 500 км; однако оборудование спутника стоит дорого, около 225—250 тыс. долл. В своем сообщении на



ФИГ. 3в. Использование спутника для передачи необработанного гамма-спектра на ЭВМ для обработки данных и немедленного возвращения информации полевым группам [14].

Английской морской технологической конференции в Брайтоне Саммерхейес [20] отметил, что проблема эффективного определения участков расположения плавучих поисковых судов была разрешена Саундерсом и Бекком путем соединения навигационной системы «Декка-Сификс» с движущейся системой, состоящей по существу из двигателей Войта — Шнайдера, установленных на носу и на корме корабля. Точность этой системы «Дина-Фикс» была установлена в 1 м на 60 км. Визуальные определения можно производить, используя постоянные рельефные карты океанского дна на глубину до 365 м, которые можно получить с помощью секторного гидролокатора.

Более 70% земной поверхности покрыто морями и океанами. Из этой площади около 7,6% имеют глубину менее 200 (около 656 футов), и поэтому здесь можно вести исследования и эксплуатацию. Табл. I показывает огромную отдачу от исследований зоны на глубине 200 м. Еще 8,5% поверхности океана имеет глубину 200—2000 м и сейчас исследуется и частично разрабатывается. Компания «R/V Проспектор» недавно осуществила опытную добычу марганца путем всасывания марганцевых конкреций на плато Блейк с глубины 300—900 м. Руководство этой компании считает, что настоящие разработки (прибыльная добыча) начнутся в 1974 г. Компания «R/V Дипси-Майнер» сейчас создает широкую систему разработки океанов на глубинах до 5500 м.

Относительно глубоководных районов моря Дигенс и Росс [3] считают, что из горячих рассолов Красного моря мощностью около 9 м и отложений впадины Атлантис II на глубине более 2 тыс. можно извлечь золота, серебра, меди и цинка на сумму более 2 млрд. долл.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Brooks D. B., Lloyd B. S.*, Mineral Economics and the Oceans, in Proceedings of Symposium on Mineral Resources of the World Oceans, Occasional Publ. № 4, School of Oceanography, Univ. of Rhode Island, 23—30, 1968.
2. *Deffeyes K. S.*, The Electron Macroprobe for Logging Deep Sea Cores, abs., Abstract booklet of the Annual Meeting of the Geological Society of America, Atlantic City, 264, 1969.
3. *Degens E. T., Ross D. A.*, The Red Sea Hot Brines, Scientific American, 222, 32—42, 1970.
4. *Duffey D., El-Kady A., Senftle F. E.*, Analytical Sensitivities and Energies of Thermal-Neutron-Capture Gamma Rays, Nucl. Inst. and Methods.
5. *Flipse J. E.*, An Engineering Approach to Ocean Mining, First Annual Offshore Technology Conference, Houston, Texas, May 18—21, Paper № OTC 1035, 1—16, 1969.
6. *Holmes C. W.*, Potential of the Sea — in the Gulf of Mexico — Geochemical Exploration Produces Exciting Results, Ocean Industry, 4, 49—52, 1969.
7. *Hoyte A. F., Martinez P., Senftle F. E.*, Neutron Activation Method for Silver Explorations, Trans. SME, 238, 1—8, 1967.
8. *Ingerson E.*, Geochemistry, Geotimes, 15, 13—14, 1970.
9. *Keys W. S., Boulogne A. R.*, Well-Logging with Californium-252, Proceedings, Soc. Prof. Well. Log Analysts Symposium, 1969.
10. *McKelvey V. E.*, Mineral Potential of the Submerged Parts of the Continents, in Proceedings of Symposium on Mineral Resources of the World Oceans, Occasional Publ., № 4, School of Oceanography, Univ. of Rhode Island, 31—38, 1968.
11. *McKelvey V. E., Wang F. F. H.*, World Subsea Mineral Resources (preliminary maps), U.S. Geol. Survey Miscell. Geologic Investigations, Map I-632 (second printing) plus discussion to accompany Map I-632, 1970.
12. *Mero J.*, Mineral Resources of the Sea, Elsevier Publishing Company, New York, 321, 1965.
13. *Mero J.*, Marine Sciences and Industrial Potential Symposium, Houston, Texas, 27—66, Transference of Technology Series, № 2, College of Business Administration, The University of Texas at Austin, 263, 1967.
14. *Senftle F. E., Hoyte A. F.*, Mineral Exploration and Soil Analysis Using in situ Neutron Activation, Nucl. Inst. and Methods, 42, 93—103, 1966.
15. *Senftle F. E., Duffey D., Wiggins P. E.*, Mineral Exploration of the Ocean Floor by in situ Neutron Absorption Using a Californium-252 (²⁵²Cf) Source, Marine Technology Soc. Journal, 3, 9—16, 1969.
16. *Senftle F. E., Philbin P. W., Sarigianis P.*, Use of ²⁵²Cf for Mineral Exploration — Comparison with Accelerators for in situ Activation of Silver, Amer. Nucl. Soc. Conference on Californium-252, TID Report 4500 (Conf.—681032), 321—346, 1969.
17. *Senftle F. E.*, Mineral Exploration by Nuclear Techniques, Mining Congress Jour., 6, 1970.
18. *Sheets H. E.*, Marine Sciences and Industrial Potential Symposium, Houston, Texas, 27—66, Transference of Technology Series № 2, College of Business Administration, The University of Texas at Austin, 263, 1967.
19. *Stone I. C., Jr.*, Geochemistry and Mineralogy of Continental Shelf Sediments off the South Carolina Coast, Ph. D. thesis, The George Washington University, Washington, D.C., 104, 1967.
20. *Summerhayes C. P.*, Offshore Minerals Technology, Underwater Science and Technology Jour., 25—27, 1969.
21. *Wakefield B. D.*, Mining Hard Minerals Three Miles Under Water, Iron Age, 61—88, 1969.

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ПОИСКИ В ГОРНЫХ РАЙОНАХ РАЗВИТИЯ СЛОЖНЫХ ЛЕДНИКОВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ, МЕДНЫЙ ПОЯС УАЙТХОРС, ЮКОН

Ф. М. Смит

«Фелпс-Додж-корпорейшн»,
Канада

ВВЕДЕНИЕ

Работа посвящена описанию результатов геохимических поисков. Исследования были начаты с целью выяснить, можно ли обнаружить скарновые пирометасоматические медные месторождения с помощью геохимического опробования почв.

Медный пояс Уайтхорс расположен непосредственно к западу от города Уайтхорс в Канаде и протягивается с севера на юг. Участки, принадлежащие компании «Нью-империал-майнс», приурочены к останцам кровли интрузива и располагаются на западном склоне долины реки Юкон. Особый интерес для исследований представляет южная часть участков над скарновыми образованиями рудного тела Коули-Парк. Компания «Нью-империал-майнс» провела буровые работы на этом месторождении, обосновавшие небольшие открытые разработки в объеме 1,2 млн. т медной и молибденовой руды.

Съемка была начата с целью определить, можно ли обнаружить зону оруденения с помощью геохимических поисков. До 1969 г. на этом участке проводилось картирование, поисковые работы с магнитометром ЕМ 16 и исследования методом вызванной поляризации. Бурение было начато главным образом на основе видимого оруденения, причем аномалии вызванной поляризации подтверждали данные геологического картирования, а иногда магнитные аномалии перекрывали аномалии вызванной поляризации. Рудное тело Коули-Парк в восточной части богато магнетитом с четкой аномалией, вызванной поляризацией. Западная часть плитовидной минерализованной зоны, хотя и не содержит магнетита (или его количества невелики), обнаруживает четкий эффект вызванной поляризации. В западной части развиты волластонит-гранат-эпидотовые скарны с борнитовой и халькопиритовой минерализацией. Коренные выходы рудного тела и непосредственно вмещающих его пород очень редки, но севернее гранодиориты и диориты хорошо обнажены.

ПРИРОДНАЯ СРЕДА

Признаки оледенения. Медный пояс Уайтхорс располагается вдоль плато в западной, охваченной оледенением части долины реки Юкон, в которой при передвижении ледника образовалась ложбина, пересекающая долину с юго-востока. Когда эта основная предгорная «лопасть» ледника Кассиара отступила, она разбилась на несколько вытянутых долинных ледников. Долина реки Юкон имеет довольно продолжительную историю наступаний и отступаний одного из этих ледников.

Движение ледника оставило флювиогляциальные и озерные отложения и намывные тилли, особенно вдоль склонов современной реки Юкон.

Разведочные шурфы и выработки, пройденные на участке компании «Нью-империал-майнс», дают некоторое представление о сложности этих отложений в районе месторождений. Для центральной и северной частей пояса характерны горизонтальные поперечные ложбины, ледниковые ленточные глины, что присуще небольшим стоячим озерам.

Южная часть пояса не была изучена. Два разведочных шурфа в районе Коули-Парк вскрыли многочисленные тиллевые и намывные осадочные отложения. Сложность и переменная мощность этих плейстоценовых отложений затрудняют проектирование и интерпретацию геохимических поисков.

Топография. О ледниковой истории этого района свидетельствуют округлые холмы и пологие долины. Самые резкие черты рельефа связаны с поперечными ложбинами, которые в настоящее время уже выработаны либо еще продолжают врезаться. Ввиду того что этот район испытал поднятие, большинство ручьев омоложено. Только река Юкон имеет некоторые черты «среднего возраста», и они связаны в основном с осадочными отложениями, образованными мощными тиллями по берегам реки.

Благодаря тому что ручьи в этом районе продолжают свою разрушительную работу, по-

всеместно локально распространены редкие тиллы и обнаженные скалы.

Одна из этих поперечных ложбин пересекает восточную часть района Коули-Парк (основание ложбины очень широкое; сток в северном направлении, к реке Юкон). Течение в этом районе обычно слабое и имеет в основном восточное направление.

Рельеф всего района плоский, при средней высоте над уровнем моря около 800 м. Единственной выступающей формой рельефа является хребет, который протягивается с востока на запад в центральной части района. Почвы на этом участке насыщены водой, дренирующей к северу.

Растительность. Основную часть лесного покрова составляют полярная сосна и белая ель. На южных склонах встречаются редкие заросли бальзамина и осины. Тамариск отсутствует, а черная ель встречается редко. Земля покрыта травой в сочетании с низкой альпийской растительностью. Слабо дренированные участки плотно поросли ивами и карликовыми березами и окружены черной елью. Болотистые участки покрыты осокой или камышом.

Летний климат. Лето в районе Уайтхорса обычно теплое до жаркого, день очень длинный (20 час в июне, 18 — в июле) и потому температура умеренная в течение всего дня. Дожди, вызванные грозами над Тихим океаном, надвигающимися к востоку от залива Аляски, обычно ограничиваются несколькими днями в течение месяца.

В 1969 г. ранней осенью выпали холодные дожди, основные осадки пришлось на конец июля и август. За август выпало 10 см осадков вместо обычных 3,8 см. Среднемесячная температура и количество осадков приведены ниже.

Почвы. Исследование почв, проведенное Дэйем [8], показывает, что северная часть «медного пояса» покрыта бурыми почвами. Они умеренно или сильно промыты и развиты на пологих и крутых склонах, а на поверхности слегка каменисты. Материнский ледниковый материал обычно представлен буроватым, крупнозернистым, мергелистым песком мощностью 0,15—1 м поверх сероватого крупнозернистого мергелистого ледникового тилля.

Общая классификация и описание относятся и к району Коули-Парк. Единственное отличие состоит в том, что в этом районе две погребенные поверхности почв и состав их материнского ледникового материала более сложен, чем описанный выше.

Четыре разведочных шурфа обнаружили здесь значительно менее мощную поверхностную зону по сравнению с аналогичными образо-

Месяц	Средняя дневная температура воздуха, °C	Средняя максимальная температура, °C	Осадки, см
Май	8	14	1,5
Июнь	13	19	2,5
Июль	13,5	19,5	4,0
Август	12	18	3,8
Сентябрь	8	13	3,3

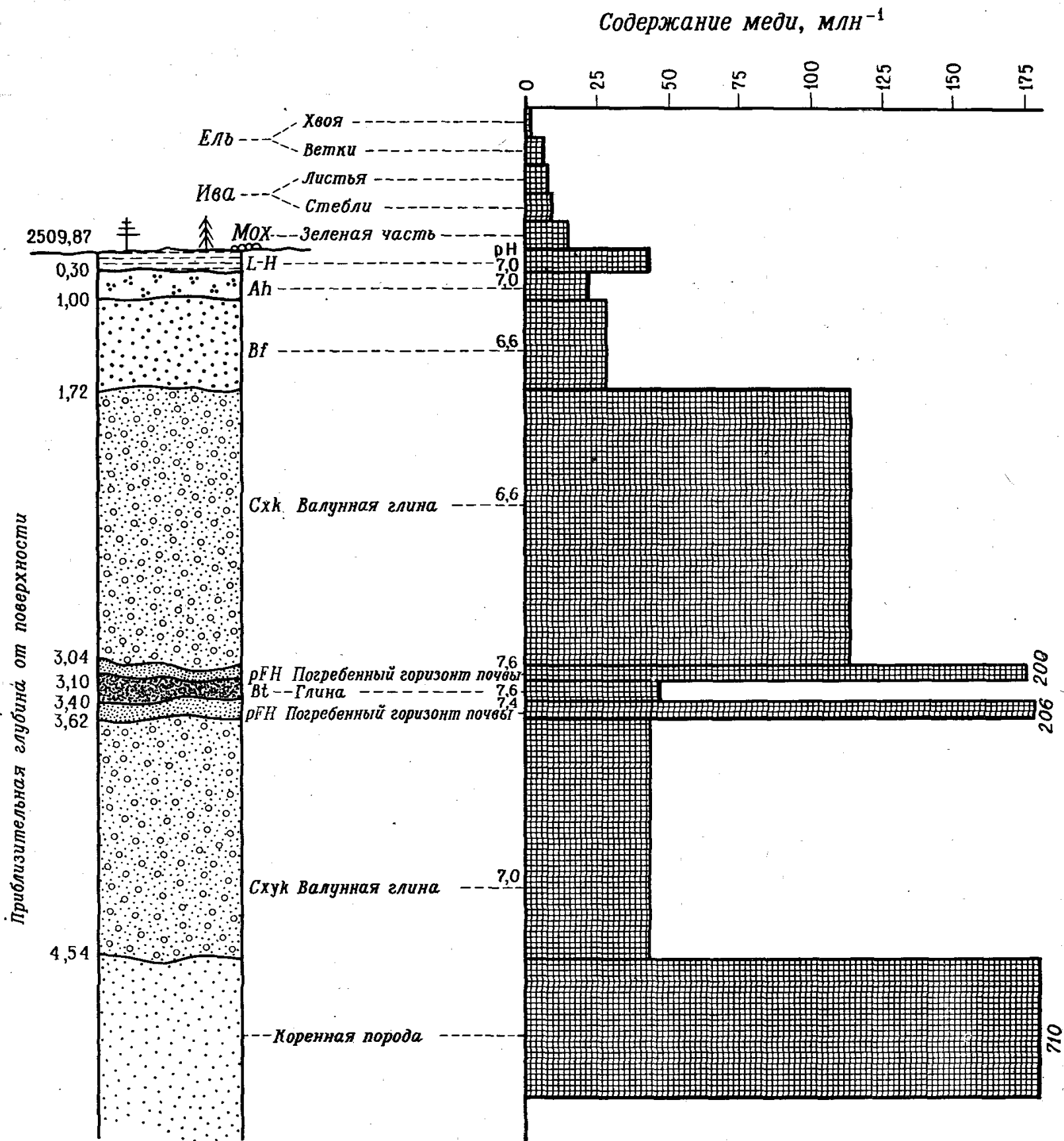
ваниями Уор-Игла, расположенного в северной части района.

Предварительные исследования с помощью опытного оборудования «Ламот — Морган» свидетельствуют о региональных колебаниях рН для района Коули-Парк 5,0—8,0. На выходах карбонатных пород рН более 6,5.

Геология. Геология листа карты Уайтхорс описана Уилером [22]. Полное описание медного пояса и особенно старых месторождений приводит Киндл [16]. Хилкер [14] в своей более подробной статье о месторождении Литл-Чиф в северной части района описал геологию и факторы, контролирующие оруденение медного пояса. С тех пор получены дополнительные данные и в интерпретацию внесены некоторые изменения.

По результатам расширенных буровых работ в зонах Уор-Игла и Джем можно заключить, что первичное распределение всех рудных месторождений в осадочных породах определяется составом осадков, примыкающих к интрузивам диорит-гранодиоритов. В верхнетриасовой группе Льюис-Ривер встречаются два основных типа пород. Первый и наиболее характерный для рудной минерализации тип пород — кремнистый доломит, пирометасоматически измененный в серпентин-актинолит-хлорит-магнетитовый скарн с борнитом, халькозином, халькопиритом и валлериитом. Этим скарном обычно представлена руда высшего сорта, имеющая самые высокие содержания золота и серебра. Второй тип пород представлен известковым кварцитом, содержащим глинистое вещество. Порода изменяется в гранат-диопсид-эпидот-тремолитовый (или волластонитовый) скарн с халькопиритом, борнитом и молибденитом.

Было замечено, что диориты часто бедны серой и в зоне скарна или поблизости от нее пересечены небольшими дайками, содержащими самородную медь и халькозин. Фаза изменения в гранодиоритах с образованием диоритов и измененных диоритов хорошо документирована. Эта экоскарновая зона отчетливо видна в поле и легко картируется.

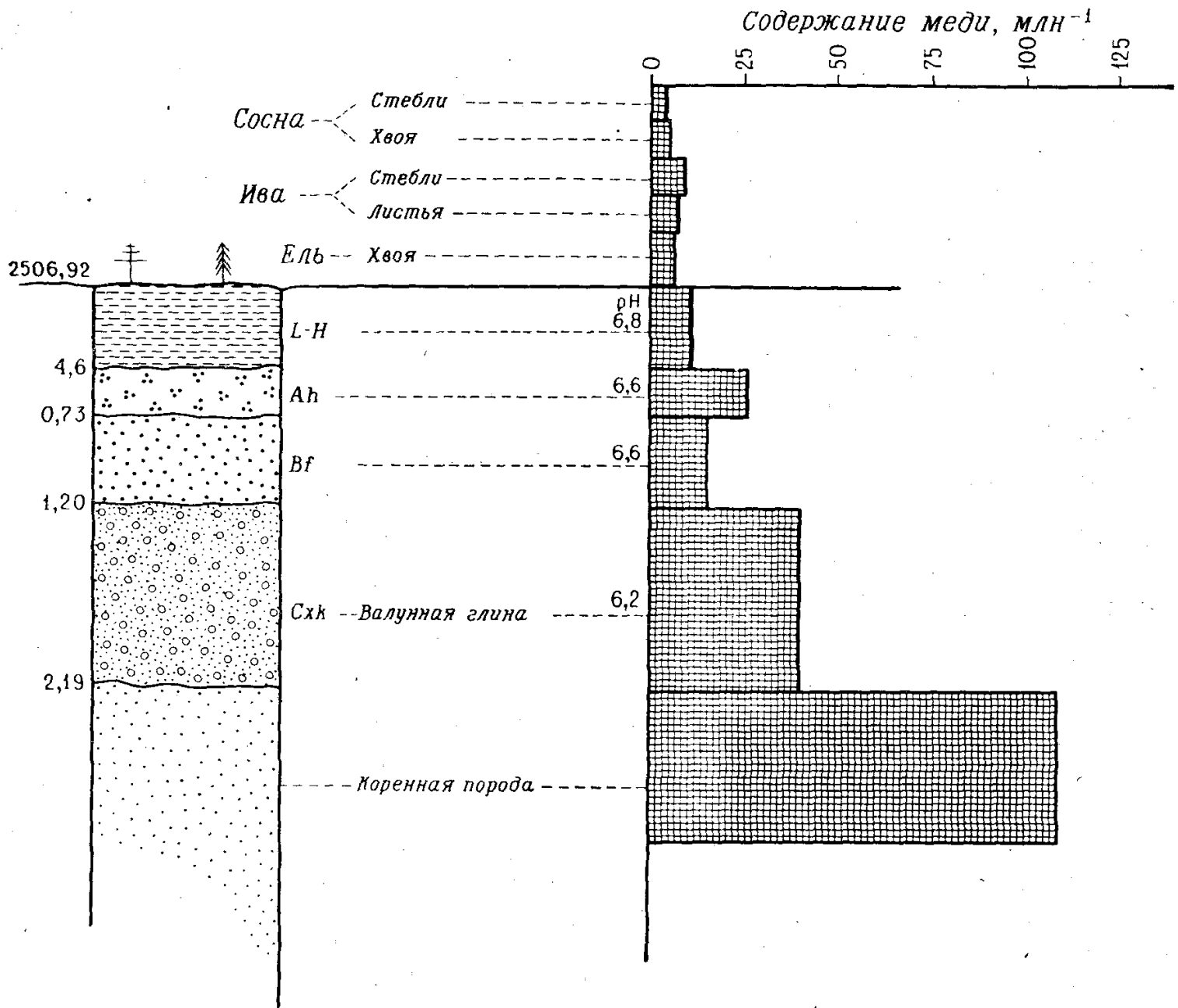


ФИГ. 1. Западный шурф (Коули-Парк).

Геология района Коули-Парк типична для медного пояса. Рудное тело располагается в осадочных породах останцов кровли группы Льюис-Ривер. Гранодиориты, преобладающие на севере, к югу переходят в диориты и сильно изменяются у рудной зоны, которая простирается с востока на запад. Осадочные породы на западе и на юге контактируют с диоритами,

а к востоку они сменяются кварцитами и карбонатными породами.

Восточная часть рудной зоны сложена главным образом магнитосодержащим материалом с волластонитом. Северные и западные части представлены более кремнистыми породами, обычно типа волластонит-гранат-эпидотового скарна, с халькопиритом как наиболее типич-



ФИГ. 2. Восточный шурф (Кюули-Парк).

ным сульфидом. Осадочные породы становятся очень кислыми на юге, особенно рядом с диоритовым участком месторождения. Изменение остальных осадочных пород очень невелико. Отдельные интрузии диорита скарнированы, однако в общем региональный метаморфизм проявлен слабо. Большая часть осадочных пород, видимых в обнажениях, представлена песчанистыми доломитами.

В пределах интрузива наблюдались тектонические нарушения и пиритизированные зоны. Порода богата магнетитом, особенно в неизмененных участках. Зоны тектонических нарушений обычно содержат халькопирит.

Геохимия. Методы. При разведке на Юконе применялись стандартные методы и приборы. Была использована первичная геофизическая сетка. Интервал между профилями 400 футов, между точками на профиле — 100 футов.

Методические разрезы. Для того чтобы исследовать разрез почв и определить опти-

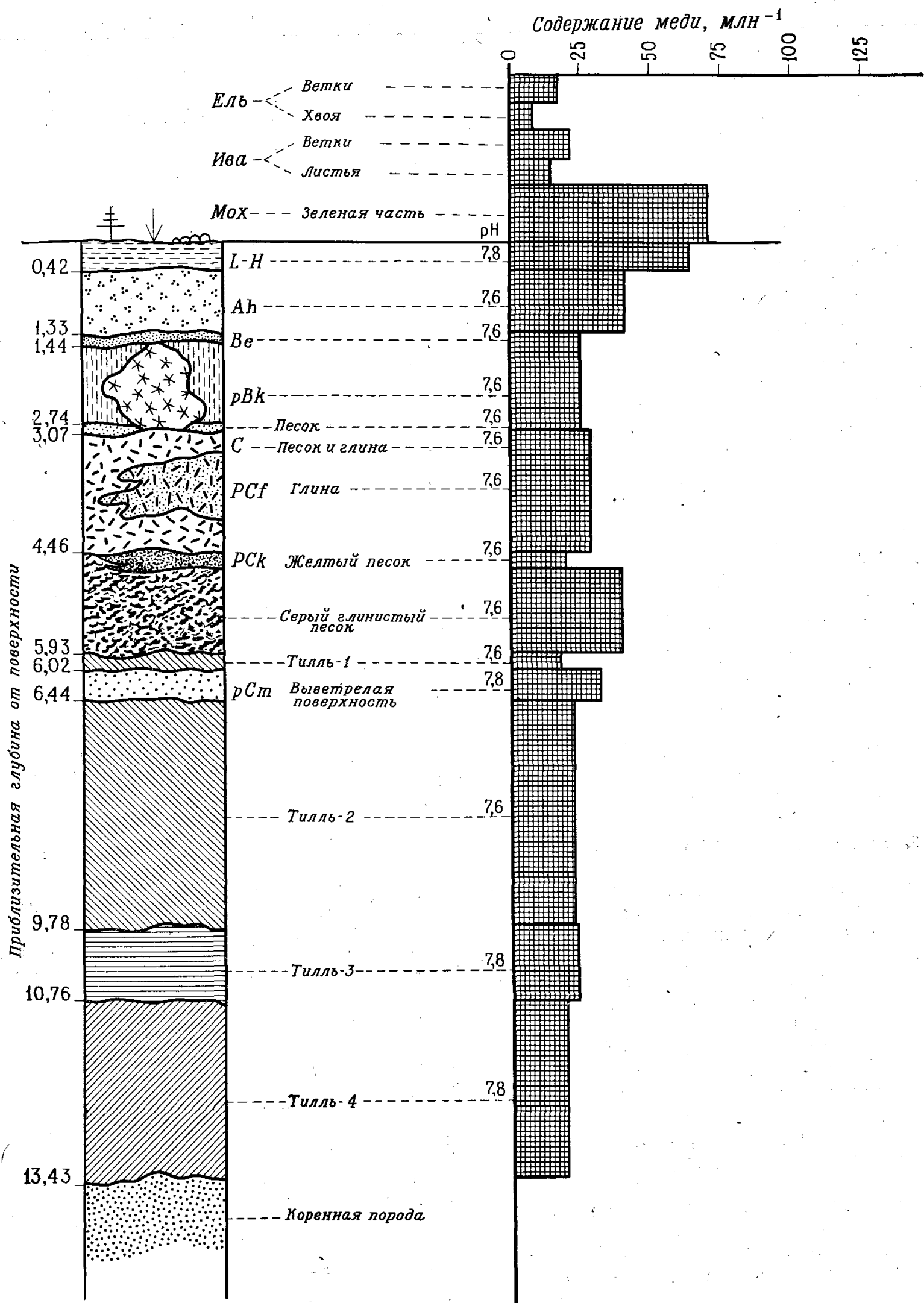
мальную глубину отбора проб, было вырыто четыре разведочных шурфа.

На фиг. 1—4 приведены разрезы почв в шурфах, а также содержание меди в растительности над шурфом и в почвах.

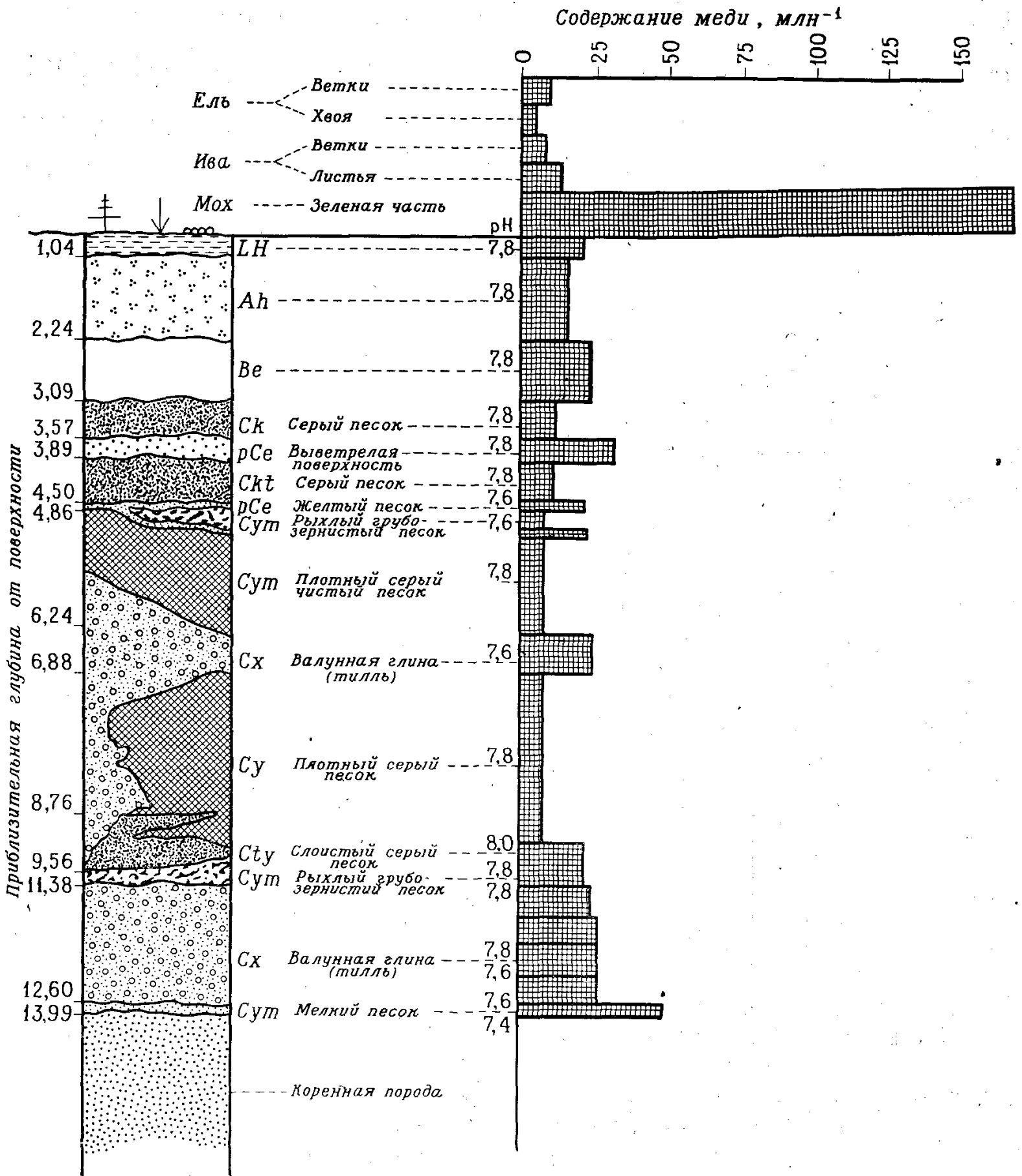
Условные обозначения [8] к этим разрезам:

- e — вынос глины,
- f — обогащенная,
- g — серая (восстановленная),
- h — обогащенная органическим веществом,
- j — слабо выраженные черты,
- k — обогащенная,
- m — вынос только растворимого вещества,
- p — реликтовая почва,
- s — обогащенная солью (и/или гипсом),
- t — обогащенная силикатной глиной,
- x — песчаная,
- y — глинистая.

Разведочные шурфы показали, что в районе Кюули-Парк опробование ненарушенных материнских тиллей наиболее эффективно для



ФИГ. 3. Шурф № 1 (Бест-Чанс).

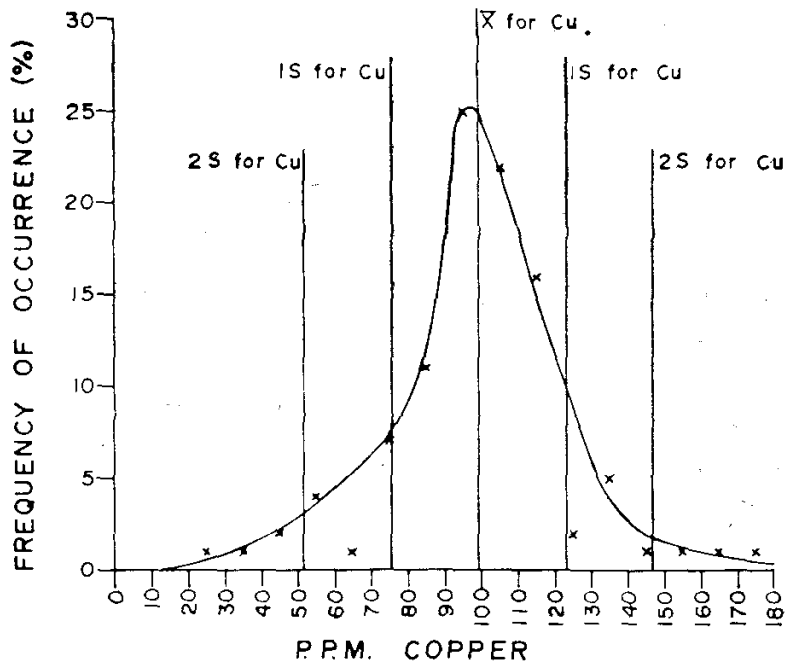


ФИГ. 4. Шурф № 2 (Бест-Чанс).

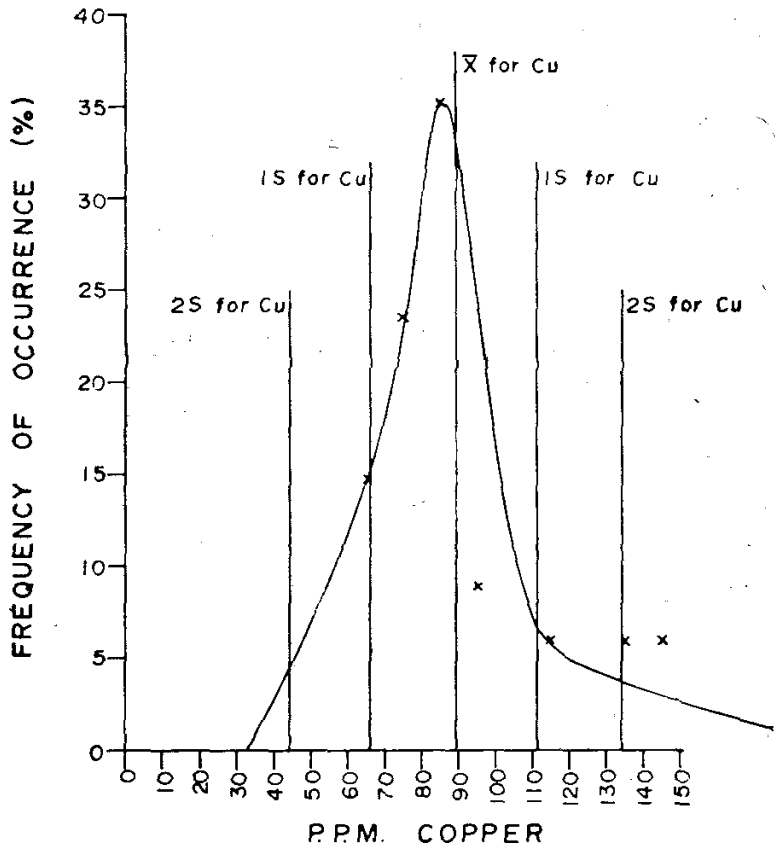
обнаружения близкой к поверхности рудной минерализации. Следовательно, опробованию подлежат части горизонта В от желтой до красной окраски в особенности при наличии в вышележащих горизонтах гумусового материала.

Кроме того, при опробовании было обнару-

жено, что рН также является важным контролирующим фактором. Близкие к поверхности отложения в западном шурфе богаче карбонатным материалом, чем в восточном. По разрезу западного шурфа в направлении к поверхности отмечается значительная кальцификация.



ФИГ. 5. Кривая частот содержаний меди.
(Значение $\bar{x} = 99,5$; стандартное отклонение, $S = 23,7$; число проб, $n = 56$.)



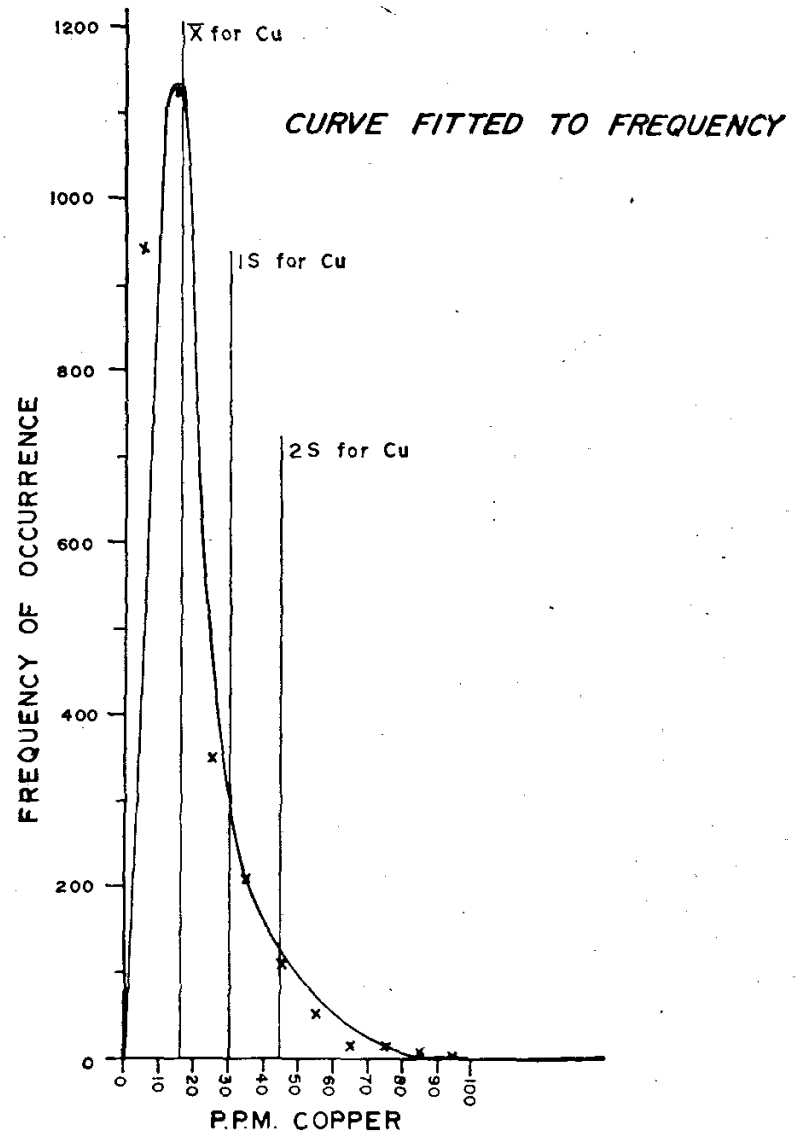
ФИГ. 6. Кривая частот содержаний меди.
(Значение $\bar{x} = 89$; стандартное отклонение, $S = 22,53$; число проб, $n = 17$.)

В восточном шурфе были установлены тонкозернистые кварциты со слабой минерализацией. Кальцификация почвы здесь минимальна, несмотря на то, что шурфы находятся на расстоянии всего 100 футов один от другого.

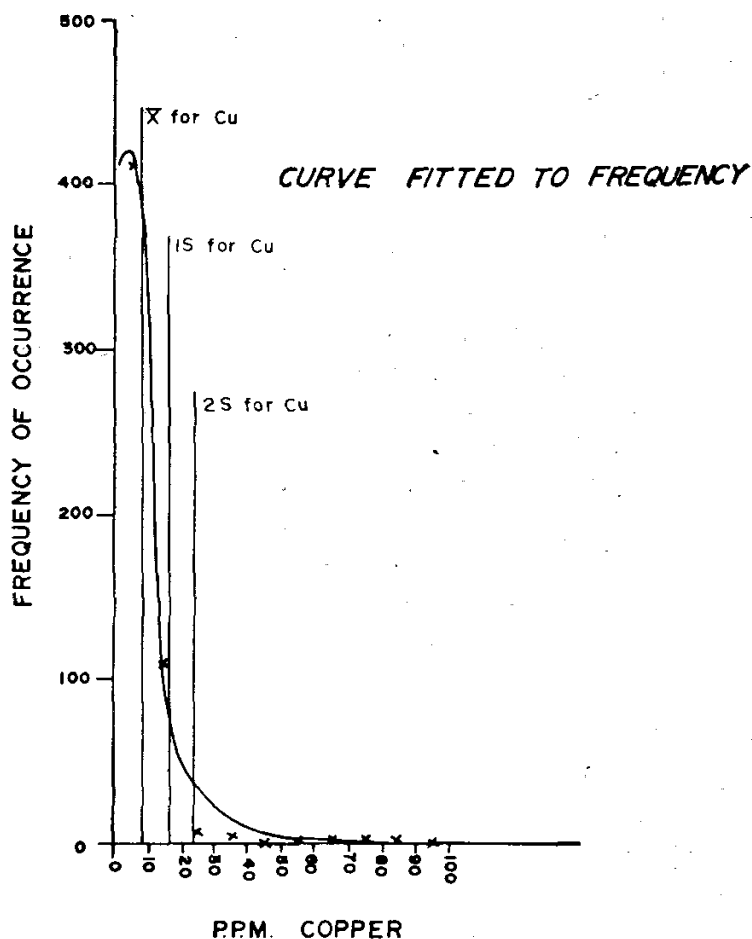
Контроль анализа проб. Чтобы найти лучшую лабораторию для целей исследования, шесть проб, взятых из одной и той же довольно однородной средней пробы, были посланы де-

6,6 + 161	6,8 + 157	6,6 + 153	6,8 + 149	7,0 + 145
6,6 + 160	6,6 + 156	6,6 + 152	6,6 + 148	6,6 + 144
6,6 + 159	6,8 + 155	6,8 + 151	6,8 + 147	6,8 + 143
6,6 + 158	6,8 + 154	6,8 + 150	6,8 + 146	6,8 + 142

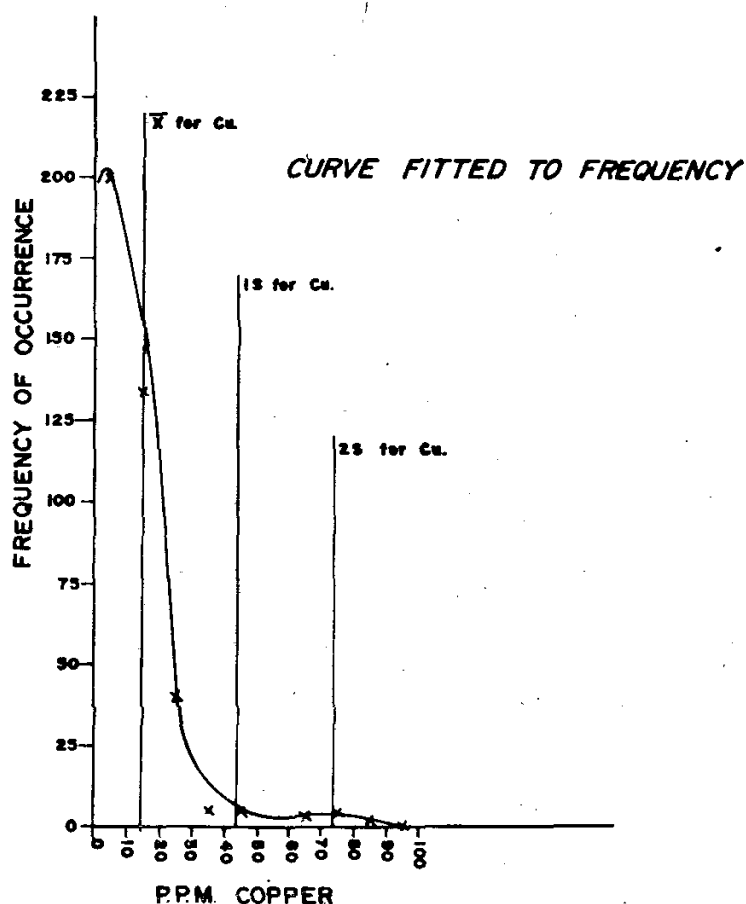
ФИГ. 7. Вариации по пробам.
Крупная цифра — величина рН, мелкая — номер образца.



ФИГ. 8. Кривая частот содержаний меди, Бест-Чанс.



ФИГ. 9. Кривая частот содержаний меди, район Бер-Каб.



ФИГ. 10. Кривая частот содержаний меди, Коули-Парк.

арифметическому, при минимальном стандартном отклонении и минимальной стоимости анализа.

В течение сезона контрольные пробы непрерывно отправляли в лабораторию из одной средней пробы вместе с пробами почв, чтобы проконтролировать химика-аналитика. Эта проверка показала, что среднее, вычисленное по данным одной компании, было ниже ожидаемого среднего, но стандартное отклонение оказалось одним и тем же. Таким образом, расхождение по контрольным пробам оказалось приемлемым.

Результаты этой работы графически отражены на фиг. 5 и 6.

Вариации геохимических данных. Была предпринята попытка исследовать вариации содержания меди в почве на очень коротком интервале. В 20 пробах, взятых по сетке 4 × 5 футов, расхождения данных оказались значительными. На фиг. 7 отражены колебания pH и содержаний меди.

Интересно, что первичная проба, взятая на две недели раньше около центра этого района опробования, дала почти такое же содержание меди, как среднее значение для всех 20 проб.

Исходя из этих данных, авторы пришли к выводу, что рациональные способы сглаживания (скользящее окно или эквивалент) не искажают информации и приведут к исключению статистически крайних значений, замеченных на небольших участках опробования.

Результаты. На фиг. 8, 9, 10 показано распределение промышленного содержания меди по трем сеткам опробования (1969 г.). Только распределение в Коули-Парк показывает некоторые признаки бимодальности. Все распределения относятся к логнормальному типу, но обычно неравномерны.

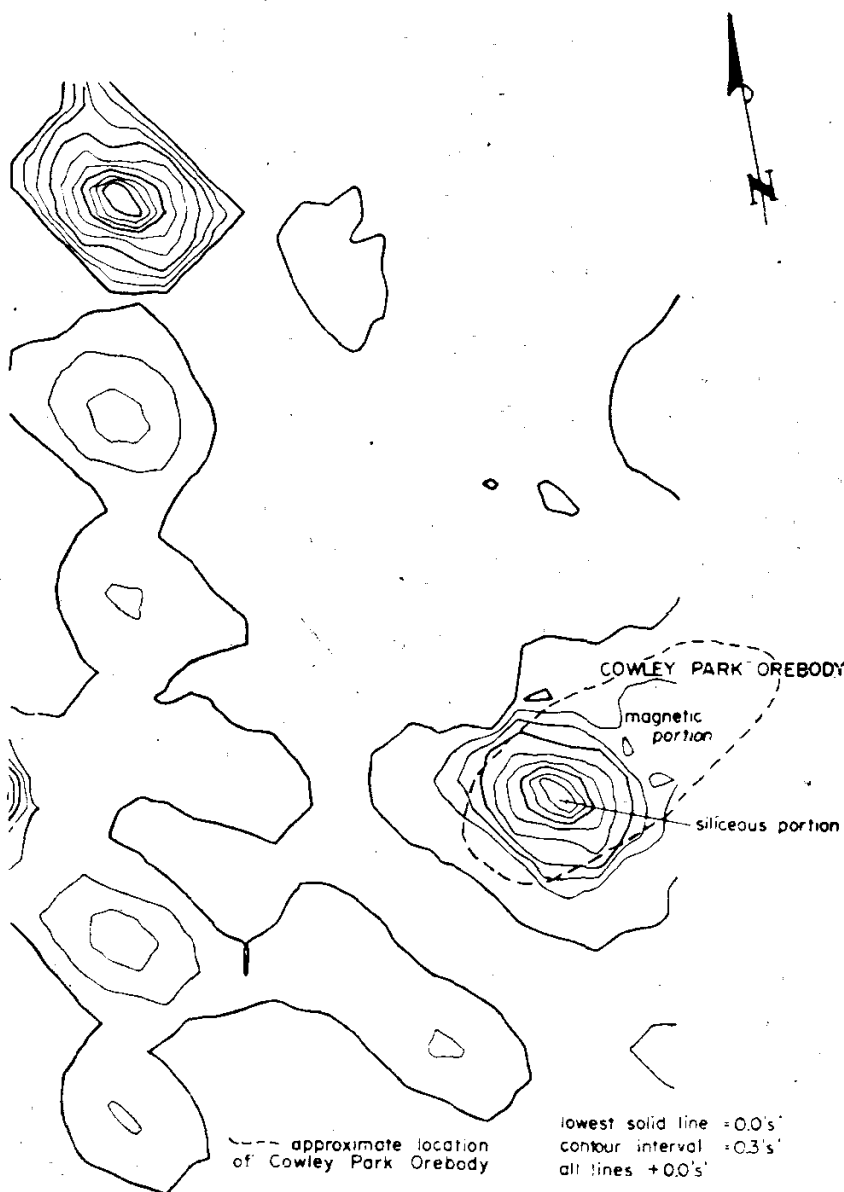
Перед оконтуриванием все значения были нормированы следующим образом:

- а) составлены графики всех значений;
- б) определены среднее и стандартное отклонение новых значений;
- в) нормированы все значения: среднее — 0,0 и стандартное отклонение — 1,0, градация оконтуривания — 0,3.

Оконтуривание производилось в основном способом скользящего среднего по программе, разработанной Смитом в университете Торонто. Эта программа определяет тренды значений на карте и изменяет форму эллипса поиска в соответствии с направлением и величиной тренда.

На фиг. 11 изображена часть результатов машинной обработки съемки в Коули-Парк. Машина вырабатывает свою собственную сетку

взяти различным компаниям. Оптимальное условие состояло в том, чтобы компания получила среднее значение, близкое к среднему



ФИГ. 11. Восточная часть геохимической контурной карты, Коули-Парк.

Пунктиром обозначено приблизительное расположение рудного тела Коули-Парк; нижняя граница — жирной линией, 00s; интервал оконтуривания 0,3s; все линии + 0,0's'.

оценок и оконтуривает эту результирующую карту. Таким образом, это карта сглаженных первичных значений, полученная двумя способами. Способ логарифмического преобразования, снимает сильное влияние нескольких очень высоких значений. Метод скользящего среднего способствует устранению случайных отклонений значений анализов, как это было отмечено выше.

Подобный эффект был замечен Глисоном и Мартином [12] при анализе проб почв и донных осадков в районе Батерст, Нью-Брансуик. Тот же метод был применен для сглаживания данных, чтобы устранить влияния вариации.

Подобная процедура, использованная при обработке данных компании «Нью-империал-майнс», позволила устранить влияние местных колебаний, вызванных изменением pH и состава тилля, и определить тренд по всей исследованной площади.

Первые 536 проб были проанализированы на медь и молибден. Там, где характер почв мешал нахождению ореолов меди в качестве возможного элемента-индикатора, был предложен молибден. Результаты этой работы были определенно отрицательными. Только восемь значений молибдена оказались выше нуля¹. Почти во всех этих пробах содержание меди было аномальным. Предполагаемая причина этого явления заключается в основном характере глубоких тиллей. Молибден был выщелочен из тиллей, что привело к слабому выражению его ореолов на поверхности. На основе этих данных, а также поскольку медь оказалась вполне действенным индикатором, был сделан вывод, что использование молибдена в качестве индикатора неэффективно даже для богатых молибденом скарновых зон. Молибден может быть избран в качестве индикатора только при опробовании тиллей, непосредственно перекрывающих коренные породы.

В связи с вышесказанным на 30 металлов было проанализировано шесть проб, чтобы установить, не окажется ли какой-либо из них дополнительным (к меди) элементом-индикатором.

Единственными полезными элементами оказались свинец и галлий, обнаруженные во всех пробах. Судя по полученным результатам, необходимо провести дополнительную работу, чтобы удостовериться, могут ли быть обнаружены совпадающие аномальные зоны. Вблизи рудных зон или внутри их нередко обнаруживались жилы свинца, цинка и серебра, но не предпринималось попыток определить, насколько часто они встречаются по всему медному поясу.

ВЫВОДЫ

Геохимические поиски пирометасоматических близповерхностных рудных месторождений в районе гляциальных тиллей требуют особой тщательности как при полевых работах, так и особенно при интерпретации результатов. Основными проблемами при этом являются следующие.

Молибден. Этот элемент не может служить индикатором в районе медного пояса Уайтхорс. Однако не исключено, что он полезен при поисках богатых молибденом участков в других районах Юкона.

pH. Это наиболее важный контролирующий фактор подвижности меди в районе медного

¹ Чувствительность анализа на молибден недостаточна. — Прим. ред.

пояса. На сетке Бэр-Каб, где коренные породы покрыты песчаными тиллями мощностью 5—10 м, геохимические поиски были почти бесполезны. Отложения относятся к магнитному типу с отчетливо вызванной поляризацией. Вблизи поверхности они заметно карбонатизированы. На поверхности произрастает полярная сосна, почвы кислые. Остальная часть опробованной площади наклонена к древнему ледниковому руслу. Несколько неподтвержденных аномальных значений (т. е. редкие высокие содержания) были обнаружены вблизи русла, там, где почвенный слой очень тонкий. Очевидно, они представляли собой небольшие количества ионов меди, принесенных из скарнов.

Таким образом, поверхностная кислая и базальная карбонатная зоны над скарнами затрудняют выявление определенной закономерности распределения элементов на поверхности, подтверждающей геофизические аномалии.

Эта интерпретация была подтверждена работами в районе Коули-Парк, где с помощью геохимии была определена только кремнистая часть близповерхностной минерализации. Восточная магнитная часть не выделялась совсем (или только 0,3 стандартных отклонений выше среднего). Поэтому для интерпретации столь тонких признаков в их связи с очевидной аномалией при отборе проб необходимо иметь представление о типах близповерхностных пород и об изменении рН в исследуемом районе.

Кальцификация тиллей. По данным изучения шурфов и изменения рН с глубиной установлено, что в исследованной обстановке опробуются материнские породы или зона С, а не зона В. Поскольку на большей части исследуемой площади зона В кислая, а зона С более основная (особенно над известковыми отложениями), опробование зоны С дает более точную оценку геохимии близповерхностных отложений и устраняет все сомнительные случаи. Однако это не исключает трудностей, связанных с глубинными скрытыми аномалиями. Учитывая малую подвижность ионов меди в основной среде, на этих участках следует применять более глубокое опробование.

Таким образом, для поисков пирометасоматических месторождений геохимические методы следует использовать совместно с геофизическими методами. Богатые магнетитом известковые скарны трудно выявить с помощью геохимии, но магнитная съемка с последующим определением вызванной поляризации позволяет обнаружить рудную минерализацию. Геохимические поиски с использованием меди в

качестве индикатора приведут к обнаружению силикатных зон.

Исследования, проведенные в Казино, показали, что для поиска порфировых месторождений на Юконе геохимию можно применять. Геохимическим методом могут быть выявлены кремнистые скарновые зоны и, возможно, порфировые зоны. Для этого необходимы тщательный отбор проб в неизменном тилле и некоторое представление о колебаниях значений рН в данном районе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ahrens L. H., The Lognormal Distribution of the Elements (1), *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 5, 49—73, 1954.
2. Ahrens L. H., The Lognormal Distribution of the Elements (2), *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 6, 121—131, 1954.
3. Ahrens L. H., The Lognormal Distribution of the Elements (3), *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2, 205—212, 1957.
4. Baas Becking et al., Limits of the Natural Environment in Terms of pH and Oxidation-Reduction Potentials, *Jour. of Geology*, 68, № 3, 243—284, 1960.
5. Chayes F., The Lognormal Distribution of the Elements — a discussion, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 6, 119—120, 1954.
6. Cloke P. L., The Geochemical Application of Eh — pH Diagrams, *Jour. of Geological Education*, 14, 140—148, 1966.
7. Craven C. A. U., Statistical Estimation of the Accuracy of Assaying, *Inst. Mining Metallurgy Trans.*, 63, Pt. 12, 551—553, 1954.
8. Day J. H., Reconnaissance Soil Surveys of the Takhini and Dezadeash Valley in the Yukon Territory, Research Branch, Canada, Department of Agriculture, 1962.
9. Delahay P. et al., Potential — pH Diagrams, *Jour. of Chemical Education*, Dec. 1950, 683—688, 1950.
10. Dreimanis A., Geochemical Prospecting for Cu, Pb and Zn in Glaciated Areas, Eastern Canada, *Geol. Cong.*, XXI Session, Pt. II, 7—19, 1960.
11. Garrels R. M., Mineral Species as Functions of pH and Oxidation — Reduction Potentials, with Special Reference to the Zone of Oxidation and Secondary Enrichment of Sulphide Ore Deposits, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 5, 153—168, 1954.
12. Gleeson C. F., Martin L., Application of Reconnaissance Geochemistry in Gaspé, *CIM Bulletin*, 62, № 688, 819—823, August, 1969.
13. Hansuld J. A., Eh and pH in Geochemical Exploration, *CIM Bulletin*; 59, № 647, 315—322, March, 1966.
14. Hilker R. G., Geology of the Little Chief Ore Deposit, *CIM Annual General Meeting*, April, 1968.
15. Horsnail R. F., Eh and pH Methods Used in North Wales, unpublished Doctoral thesis, Univ. of London, 1968.
16. Kindle E. D., Copper and Iron Resources, Whitehorse Copper Belt, Yukon Territory, *Geol. Survey Canada*, Paper 64—41, 1964.
17. Krumbein W. C., Garrels R. M., Origin and Classification of Chemical Sediments in Terms of pH and Oxidation — Reduction Potentials, *Jour. of Geology*, 60, № 1, 1—33, 1952.

18. *Kuroda P. K., Sandell E. B.*, Geochemistry of Molybdenum, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 6, 35—63, 1954.
 19. *Miller R. L., Goldberg E. D.*, The Normal Distribution in Geochemistry, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 8, 53—62, 1955.
 20. *Nackowski et al.*, Statistical Design and Analysis of

Geochemical Exploration Surveys, *Mining Congress Journal*, May, 56—59, 1964.
 21. *Shaw D. M., Bankier J. D.*, Statistical Methods Applied to Geochemistry, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 5, 111—123, 1954.
 22. *Wheeler J. O.*, Whitehorse Map Area, Yukon Territory, *Geol. Survey Canada, Memoir 312*, 1961.

ДИФФЕРЕНЦИАЦИЯ ПАРОВ И ИОНОВ РТУТИ В ПОЧВАХ

П. Б. Трост,
 Р. Е. Бискве
 Горная школа Колорадо

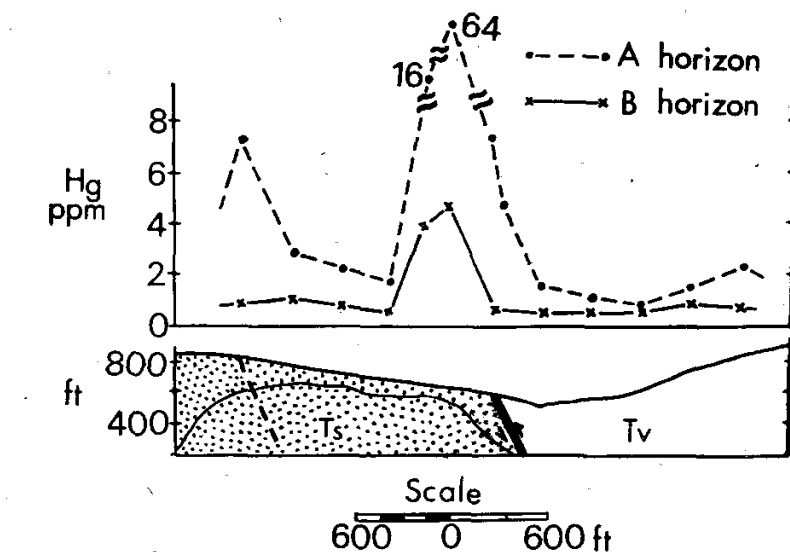
Ниже излагаются результаты полевых исследований, направленных на определение влияния органического вещества на вторичное рассеяние ртути.

Ртутный рудник Бонанца. Одним из исследованных участков был ртутный рудник Бонанца в округе Дуглас, штат Орегон. Рельеф района характеризуется широкими долинами, разделенными лесистыми округлыми холмами. По мнению Брукса [1], киноварь является основным рудным минералом и залегает в нижнеэоценовых мелкоземах, сланцеватых глинах и песчаниках. Основной взброс Бонанца пересекает этот район приблизительно в северо-восточном направлении с наклоном к востоку.

Профили опробования почв были проведены параллельно и перпендикулярно зоне взброса. В каждой точке опробования исследовались как богатые органическим веществом (А, или лесная почва), так и глинистые (В) почвенные горизонты. Профиль I пересекал известную минерализацию, в то время как на профиле II минерализации не обнаружено. Результаты исследования по профилям представлены на фиг. 1.

На профиле I как богатые глиной, так и богатые органическим веществом почвенные горизонты отражают минерализацию и расположение взброса. Ввиду того что линия взброса находится близко ко дну долины и перекрывается наносами, высокое содержание ртути можно объяснить движением ионов ртути вниз по склону или захватом паров ртути, поднимающейся из взброса.

В каждой точке опробования горизонты, богатые органическим веществом, содержат ртути больше, чем глинистые горизонты. На определенных участках, например над взбросом, аномально высокие пробы обнаружили

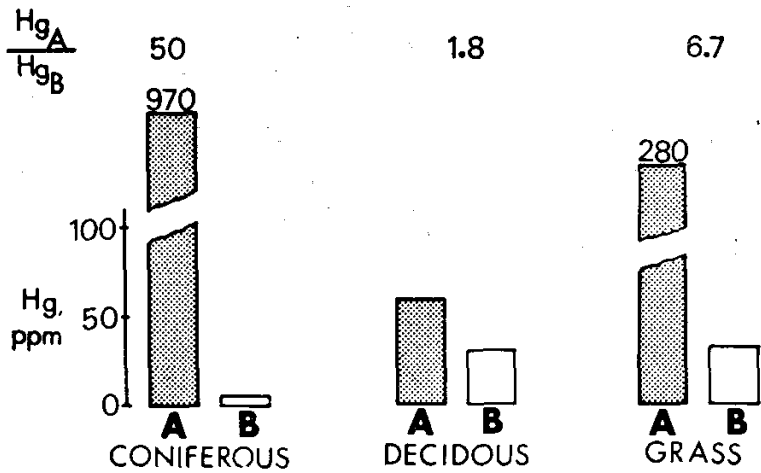


ФИГ. 1. Профиль I.

в горизонте А более высокое содержание ртути, чем в горизонте В. Поскольку взброс и участки с ртутной минерализацией являются потенциальными источниками парообразной ртути, при полевых исследованиях предполагалось, что дифференциация парообразной и непарообразной ртути может стать возможной при сравнении содержания ртути в двух почвенных горизонтах. Это предположение привело к созданию проекта описанных ниже лабораторных исследований.

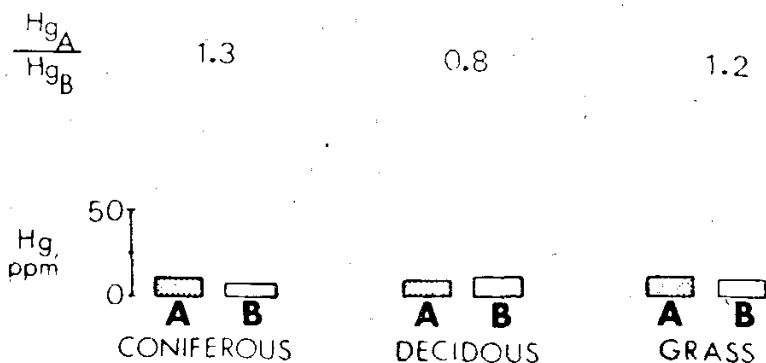
Пробы почвенных горизонтов А и В были взяты в Колорадо под хвойной, лиственной и травянистой растительностью. Район опробования был выбран с целью свести к минимуму влияние геологических факторов.

Часть проб обоих горизонтов с каждой точки опробования помещалась в герметический сосуд с жидкой ртутью, находящейся в равновесии с паром, при температуре 25°. Через пять дней пробы анализировали по методу Пири — Биск-



ФИГ. 2. Поглощение паров ртути.

Подпись под колонками слева направо: хвойные деревья, лиственные деревья, трава.



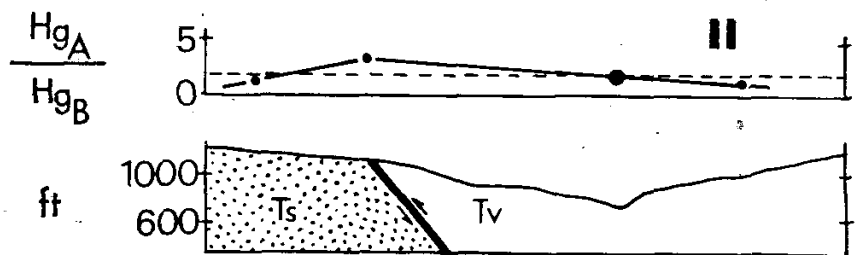
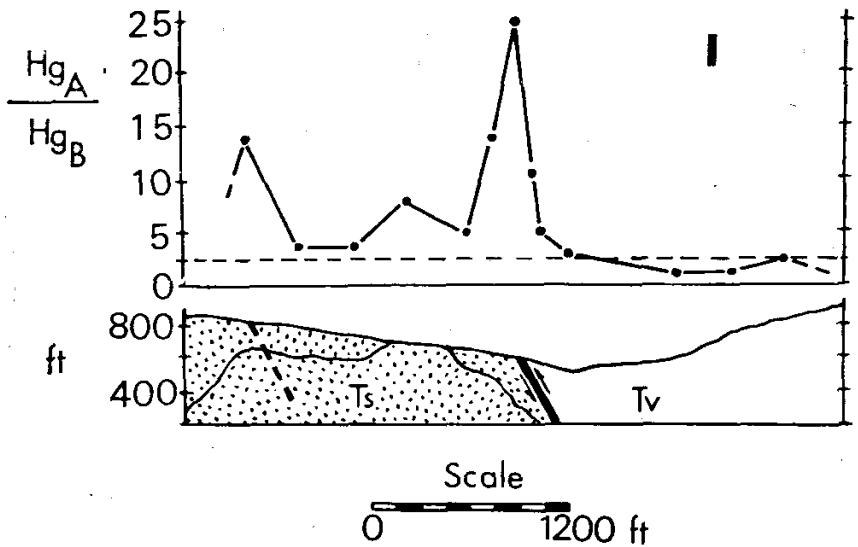
ФИГ. 3. Поглощение ионов ртути из водного раствора.

Подпись под колонками слева направо: хвойные деревья, лиственные деревья, трава.

ве [3]. Почвы, взятые из горизонта А или других богатых органическим веществом горизонтов, обнаружили большую способность поглощать пары ртути, чем почвы из горизонта В (фиг. 2). Общее потребление ртути в почвах горизонтов А и В было выражено соотношением (Hg_A/Hg_B) и колебалось от 1,8 до 50.

Подобные пробы с каждого почвенного горизонта уравнивали со 100 мл водного раствора, содержащего ионы ртути в концентрациях $10-100 \text{ млн}^{-1}$ при рН 6,0. Анализ промытой и высушенной твердой фазы показал примерно одинаковые количества ионной ртути, поглощенной почвами горизонтов А и В, несмотря на содержание ионов ртути более 10 млн^{-1} (фиг. 3). Почвы горизонта А поглощали преимущественно парообразную ртуть в отличие от ионной. Соотношения (Hg_A/Hg_B) были достаточно низкими, обычно ниже двух. На основе лабораторных данных для определения различия между поглощением парообразной и ионной ртути был выбран произвольный коэффициент 2.

В исследованных почвенных горизонтах наиболее распространенным глинистым минералом был каолинит. Разнообразие типов глин, оче-



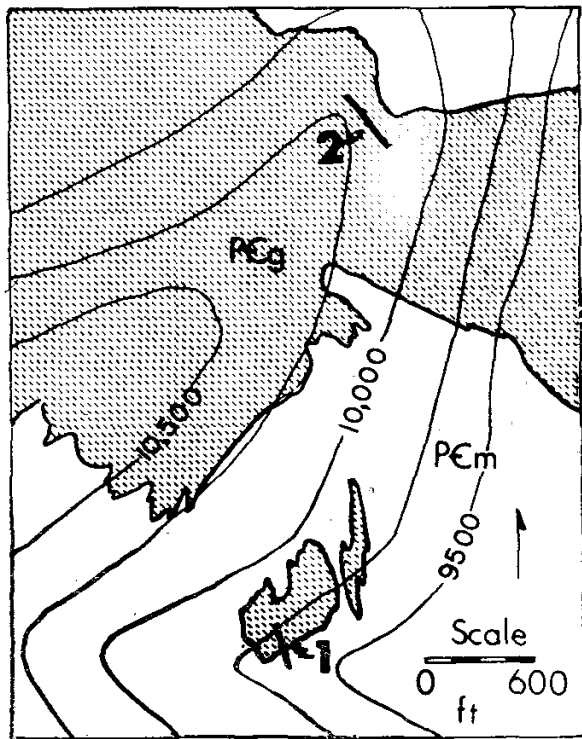
ФИГ. 4. Корреляция соотношения Hg_A/Hg_B с геологическими данными.

видно, не является определяющим фактором, так как экспериментальные результаты по монтмориллонитовым, иллитовым и каолинитовым глинам были довольно стабильными.

Высокое содержание ртути в богатом гумусом горизонте А может быть результатом поглощения растениями и последующего отмирания растений («обогащение Гольдшмидта» [2]). На основе лабораторных исследований эта возможность казалась невероятной, так как парообразная ртуть предпочтительно поглощалась богатым гумусом горизонтом А. Чрезвычайно высокое содержание ртути в горизонте А, покрывающем сбросы и минерализованные зоны, объяснялось как результат предпочтительного захватывания парообразной ртути в богатом гумусом горизонте А.

Для района рудника Бонанца при использовании значения произвольного коэффициента оконтуриваются участки наиболее вероятного выхода парообразной ртути (фиг. 4). Значения коэффициентов колеблются от 5 до 25 над взбросом и от 4 до 15 над минерализованной зоной. На неминерализованном участке значения коэффициентов колеблются от 1 до 2, что позволяет предположить существование непарообразного источника.

Район Джорджтауна. Второе полевое исследование в других геологических и климатических условиях было проведено близ Джордж-



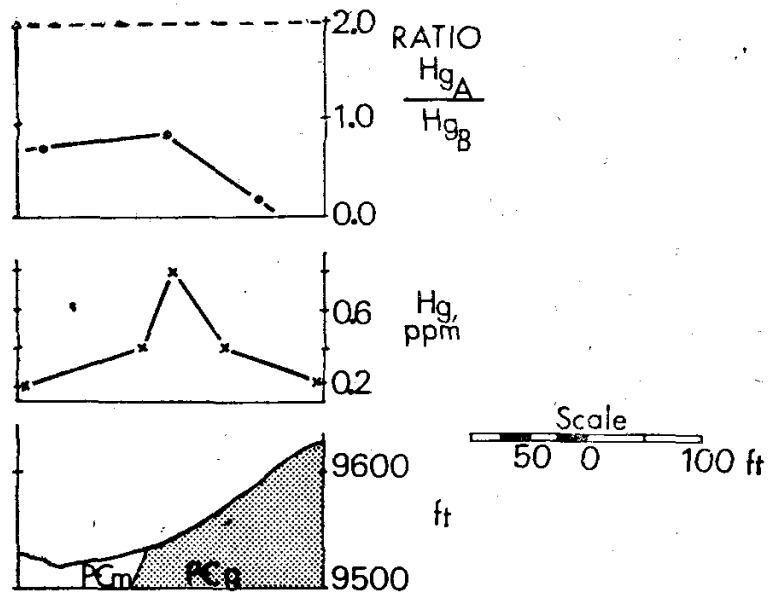
ФИГ. 5. Район Джорджтаун.

тауна в штате Колорадо. Условия этого района отличны от условий района Бонанца. Крутые склоны, покрытые редкой растительностью, средняя высота около 10 000 футов, количество осадков около 30 дюймов в год. Район Джорджтауна исследовался ранее и был предметом рассмотрения на предыдущем геохимическом симпозиуме [4].

Литология этого района характеризуется распространением контактных фаций, располагающихся между метаморфическими породами и гранитами докембрийского возраста. В районе распространены граниты, амфиболиты и мигматиты.

Сульфидная минерализация обычно представлена галенитом, сфалеритом, пиритом и сульфосолями серебра. В двух участках ртутных аномалий, обозначенных на фиг. 5 цифрами 1 и 2, были выбраны участки для проведения опытных профилей. Предыдущие геохимические исследования участка 1 показали содержание серебра, свинца, цинка и меди, лишь немного превышающие фоновые. Наоборот, на участке 2 обнаружены серебряные, свинцовые, цинковые и медные аномалии, в 100 раз превышающие фоновые содержания этих металлов.

Бурение на участке 1, расположенном в долине, не выявило сульфидной минерализации или тектонического нарушения, но обнаружило значительную ртутную аномалию в почвенном горизонте В (фиг. 6). Коэффициент соотношения ртути в почвенных горизонтах А и В был гораздо ниже 2, что указывает на непарообразный характер источника ртути. Бассейн небольшой

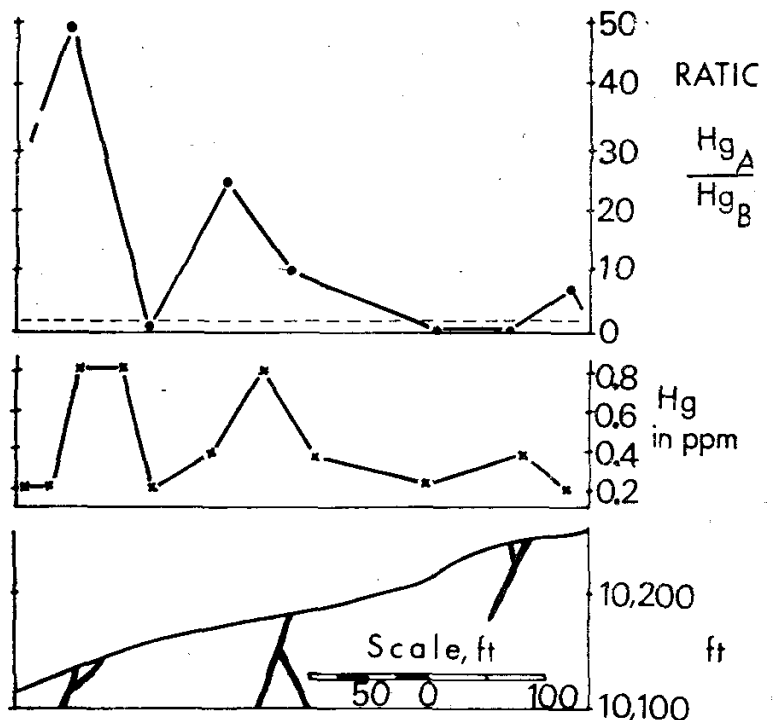


ФИГ. 6. Участок 1.

речки, протекающей поблизости от точек опробования, охватывает площадь около 16 кв. миль, на которой известно по крайней мере 6 заброшенных рудников.

Бурение на участке 2 обнаружило сульфидную минерализацию. Интенсивные ртутные аномалии в горизонте В вновь были специально исследованы (фиг. 7). Установлено, что они хорошо коррелируют с аномалиями, выделенными с помощью соотношения Hg_A/Hg_B . Значения этого коэффициента над сульфидными жилами колебались от 8 до 50, что позволяет предполагать предпочтительное захватывание парообразной ртути в лесной почве по сравнению с илистым горизонтом.

Интересно заметить, что содержание ртути в илистой фракции с участка 1 было таким же



ФИГ. 7. Участок 2.

высоким, как и содержание ртути в глинах, покрывающих сульфидную минерализацию на участке 2, хотя при бурении на участке 1 и не было обнаружено сульфидной минерализации или тектонической зоны.

Выводы. Лабораторное изучение и данные двух полевых исследований показывают, что дифференциация парообразных и непарообразных источников ртути может быть достигнута путем опробования и сравнения содержаний ртути в горизонтах, богатых органическими веществами, и в глинах. Этот подход может помочь при интерпретации результатов геохимических поисков с использованием ртути как элемента-индикатора.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МЕДИ И ЦИНКА В ПОРОДАХ БАТОЛИТА ГУИЧОН-КРИК, БРИТАНСКАЯ КОЛУМБИЯ

Д. Брабек, Вм. Х. Уайт
Университет Британской
Колумбии, Ванкувер

ВВЕДЕНИЕ

Геология и геохронология батолита Гуичон-Крик в центре южной части Британской Колумбии известны сравнительно хорошо в основном благодаря недавним исследованиям Норткоута [8], но геохимия слагающих его пород изучена мало. Настоящая работа, в которой рассматривается распределение меди и цинка в неминерализованных гранитах батолита, основана на анализах более 300 проб, многие из которых были использованы Норткоутом для геологического изучения и определения возраста калий-аргоновым методом. Ни одна из проанализированных проб не имела видимых признаков гидротермального изменения или эпигенетической минерализации.

ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ОЧЕРК

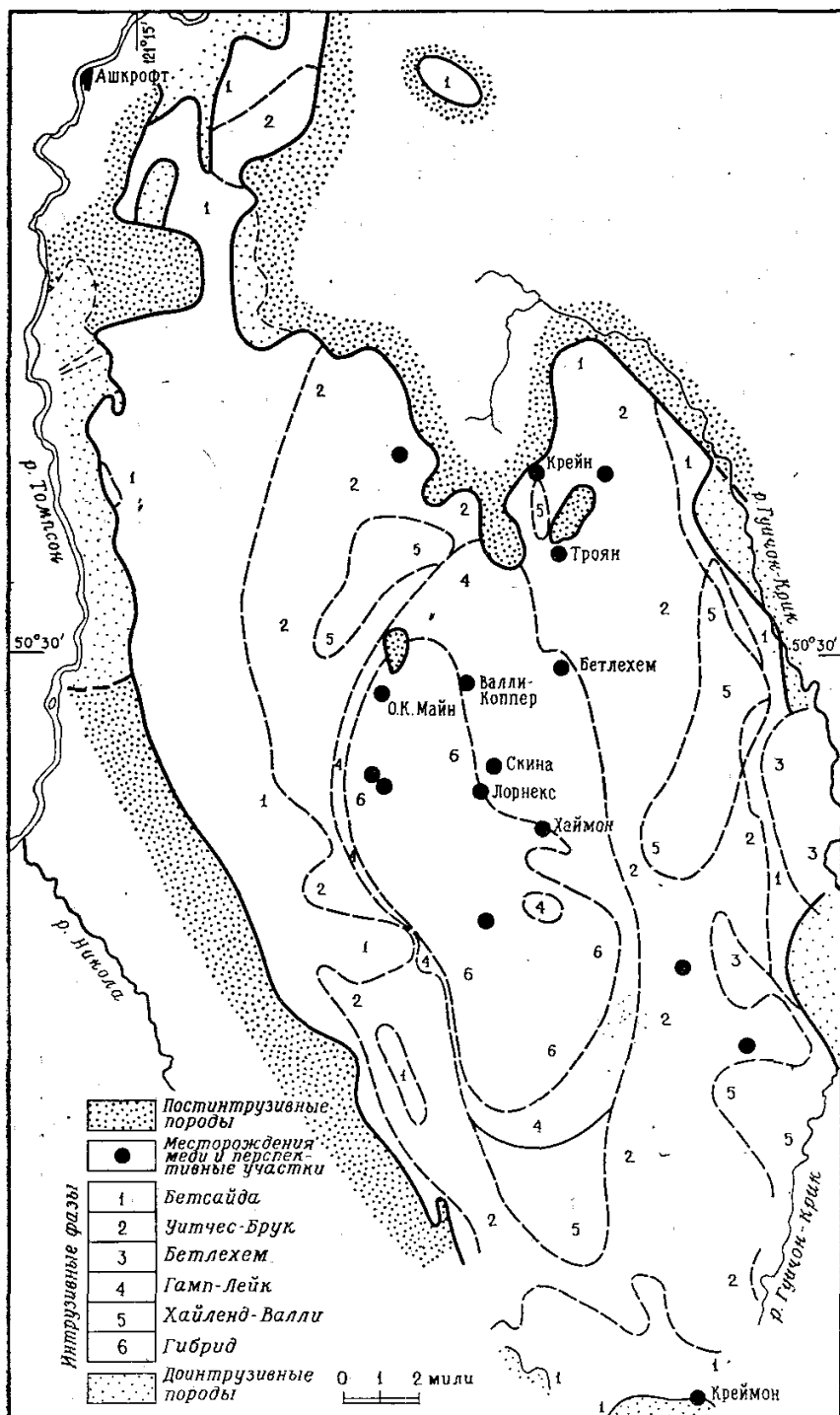
Батолит, имеющий форму неправильного овала длиной около 72 км и шириной 26 км, интродуцирует верхнетриасовые и более древние вулканические и осадочные породы и перекрыт с несогласием среднеюрскими осадочными породами и третичными базальтами (фиг. 1). Он состоит из отдельно картируемых разновидностей гранитных пород, считающихся фазами; каждая фаза имеет совершенно отчетливые структурные и петрографические особенности с ин-

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Brooks H. C.*, Quicksilver in Oregon, Bull. 55, State of Oregon, Department of Geology and Mineral Industries, 223, 1963.
2. *Goldschmidt V. M.*, The Principles of Distribution of Chemical Elements in Minerals and Rocks, Chem. Soc. (Lond.) Jour., Pt. 1, 655—673, 1937.
3. *Pyrih R. Z.*, *Bisque R. E.*, Determination of Trace Mercury in Soil and Rock Media, Econ. Geol., 64, № 7, 825—828, 1969.
4. *Stevens D. N.*, *Bloom D. N.*, *Bisque R. E.*, Evaluation of Mercury Vapor Anomalies at Colorado Central Mines, Clear Creek County, Colorado, Colorado School of Mines Quarterly, ed. F. C. Canney, International Geochemical Exploration Symp., 64, № 1, Jan., 573—574, 1969.

трузивными взаимоотношениями с соседними фазами. Наиболее характерно для батолита в целом концентрическое расположение пород, представляющих четыре главные его фазы в возрастном порядке, что подтверждается контактовыми взаимоотношениями. Самая древняя краевая фаза Гибрид сменяется к внутренней части батолита фазой Хайленд-Валли, за ней следует фаза Бетлехем и самая молодая фаза Бетсайда, которая образует хорошо ограниченное ядро длиной около 21 км и шириной 8 км. Фазы более ограниченных размеров, такие, как Ле-Рой, Гамп-Лейк и Уитчес-Брук, имеют секущие взаимоотношения с породами главных фаз и залегают в виде неправильных масс и серий даек гранитной структуры в породах всех фаз, за исключением фазы Бетсайда. Несколько разновидностей даек порфиров, имеющих типично тонкозернистую до афанитовой или даже трахитовую структуру основной массы, пересекает все гранитные породы.

Отдельные фазы гетерогенны и представлены двумя или несколькими разновидностями пород, выделяемыми по различиям в минеральных ассоциациях и (или) структуре. Контакты между разновидностями пород в основном постепенные. Норткоут описал и закартировал две разновидности, отнесенные к Гуичон и Чатавей, которые образуют фазу Хайленд-Валли.



ФИГ. 1. Геологическая карта батолита Гуичон-Крик [8].

Породы различных фаз имеют сходный облик, но образуют узкий по составу ряд от кварцевых диоритов до кварцевых монцонитов. Фаза Гибрид представлена главным образом кварцевыми диоритами, сравнительно богатыми роговой обманкой и биотитом. Промежуточные фазы сложены в основном гранодиоритами, содержащими несколько процентов темноцветных минералов. Относительно молодые фазы, такие, как Уитчес-Брук и Бетсайда, варьирующие по составу от гранодиоритов до кварцевых монцонитов, обогащены кварцем и содержат биотит, но в них очень мало роговой обманки или она совсем отсутствует.

Особенности пород, которыми сложен батолит Гуичон-Крик, укладываются в петроге

нетическую модель, предложенную Норткуотом [8]. Из родоначальной магмы, кристаллизующейся на глубине, порции частично раскристаллизованной магмы интродировали через определенные (вероятно, короткие) интервалы, формируя наблюдаемую последовательность и характер залегания фаз. Первоначальный состав наиболее ранней фазы Гибрид изменился под влиянием ассимиляции вмещающих верхнетриасовых вулканических пород, в то время как более поздние внутренние фазы оказались изолированными от источника контаминации. Каждый последующий импульс достигал более высокого уровня земной коры, возможно, в результате прогрессирующего воздымания всего магматического комплекса в комбинации с глубокой эрозией. Более древние фазы являются типично мезозональными, тогда как более молодые фазы, в особенности фаза Бетсайда и еще более молодые порфириновые дайки, характерны для эпизональных или даже субвулканических условий становления.

Батолит Гуичон знаменит своими богатыми месторождениями меди. На фиг. 1 обозначены названия двух эксплуатирующихся месторождений, Бетлехем и Креймон, и большинства разведанных объектов, находящихся на стадии подготовительных работ, а также показаны некоторые менее разработанные и более мелкие месторождения. Эта картина распределения не полная, поскольку часть экономически важных месторождений, скрытых под обширным покровом третичных базальтов и ледниковыми отложениями, несомненно, остается невыявленной. Однако, исключая рудное тело Креймон, которое является продуктом пирометасоматического замещения верхнетриасовой толщи, все известные месторождения ограничены в распространении внутренними частями батолита, и, по существу, даже в краевой фазе Гибрид никаких проявлений меди не установлено.

Все рудные тела контролируются разломами. Иногда это изолированные одиночные или сложные жилы, но наибольший экономический интерес имеют более или менее изометричные массивы с густой сетью трещин и довольно простым набором рудных минералов (халькопирит, борнит, небольшое количество гипогенного халькозина и молибденита) в виде корок на поверхности трещин. Пирит редок, а сфалерит практически отсутствует.

Эпигенетическая медь этих месторождений, вероятно, переносилась и отлагалась из гидротермального остаточного раствора в конце магматического процесса, содержащего небольшую часть меди расплава. Очевидно, подобного отделения цинка к этапу эпигенеза не происходит.

Это согласуется с распределением сингенетичной меди и цинка и с их поведением в процессе магматической эволюции, чему и посвящена главным образом эта статья.

АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДИКИ

Пробы были подготовлены к анализу путем истирания до -80 меш на установке с керамическим покрытием во избежание заражения. В целом все анализы — 352 на медь и 258 на цинк — выполнены простым и быстрым методом экстракции с царской водкой. Подробно эта методика, включая подготовку проб, описана ранее [12]. В смеси плавиковой и хлорной кислот полностью разлагалось 37 проб, и полученные результаты использовались для оценки эффективности экстракции меди и цинка царской водкой (табл. I). Как показано ниже, интервалы концентраций для сравнения были выбраны в соответствии с общим распределением данных. Доля меди и цинка, экстрагированных из проб царской водкой, возрастает с увеличением концентраций металлов. Однако доля меди, извлеченной царской водкой, колеблется от 70 до 90%, а цинка — примерно около 50% (табл. I). Коэффициент корреляции (R в табл. I) показывает, что общее и экстрагированное содержания коррелируются намного лучше для меди, чем для цинка, и значение R уменьшается с повышением содержания металла в породах.

В более ранних работах показано, что извлечение царской водкой дает ту же разницу между низкими и высокими концентрациями меди и цинка, что и определение полного содержания металла [3]. Таким образом, воздействие царской водкой оказывается достаточ-

Таблица I

Эффективность экстракции меди и цинка царской водкой

N	AR _x (колебания содержания), млн-1	AR _x (среднее), млн-1	Средняя экстракция, %	R*	Уровень значимости
Cu 18	2—50	15	71	0,95	0,001
10	57—110	76	83	0,90	0,001
9	115—155	132	91	0,58	н. с.
Zn 23	9—24	20	48	0,54	0,01
14	27—45	34	55	0,28	н. с.

N — количество проб.
AR_x — количество металла, экстрагированное царской водкой.
н. с. — несущественная связь при уровне значимости 0,05.

ным для того, чтобы заметить региональные колебания содержания металла в породе.

Содержания магния и железа были определены в 49 пробах, разложенных смесью плавиковой и хлорной кислот. Содержания металлов в растворах всех проб замерены с помощью атомно-абсорбционного спектрофотометра «Тектрон АА-4». Содержания серы в 68 пробах определены методом окисления и последующего титрования освобожденной SO₂ иодатом (система Леоко [6]).

Слишком маленькие для химической обработки 63 минеральные фракции проанализированы методом эмиссионной спектроскопии на ряд элементов, включая медь и цинк.

Анализ на ртуть в выборочных пробах выполнен с использованием специальной атомно-абсорбционной методики [1].

ТОЧНОСТЬ И НАДЕЖНОСТЬ АНАЛИЗОВ

Точность анализов на медь, цинк, магний и железо в породах определена методом статистических серий [5]. Серия готовилась путем смешивания двух кварцевых диоритов из батолита Гуичон-Крик, имеющих различные

Таблица II

Точность анализов Cu, Zn, Fe, Mg, Hg и S

Метод	Колебания содержания, млн-1	2С, %*	Примечание
Cu AR _x —АА	17—88	9,5	Статистическая серия
Cu HF—HClO ₄ —АА	23—100	36,4	То же
Cu Эмиссионная спектрография	19—34	58,2	7 дубликатов
Zn AR _x —АА	19—71	8,8	Статистическая серия
Zn HF—HClO ₄ —АА	30—87	22,1	То же
Zn Эмиссионная спектрография	19—35	40,8	7 дубликатов
Fe HF—HClO ₄ —АА	13 000—36 000	15,6	Статистическая серия
Mg HF—HClO ₄ —АА	7 000—17 000	12,5	То же
Hg АА	0,052—1,120	11,5	6 дубликатов
S Окисления—титрования	350—450 ¹	27,2	5 дубликатов
S То же	100—140 ²	30,4	5 дубликатов

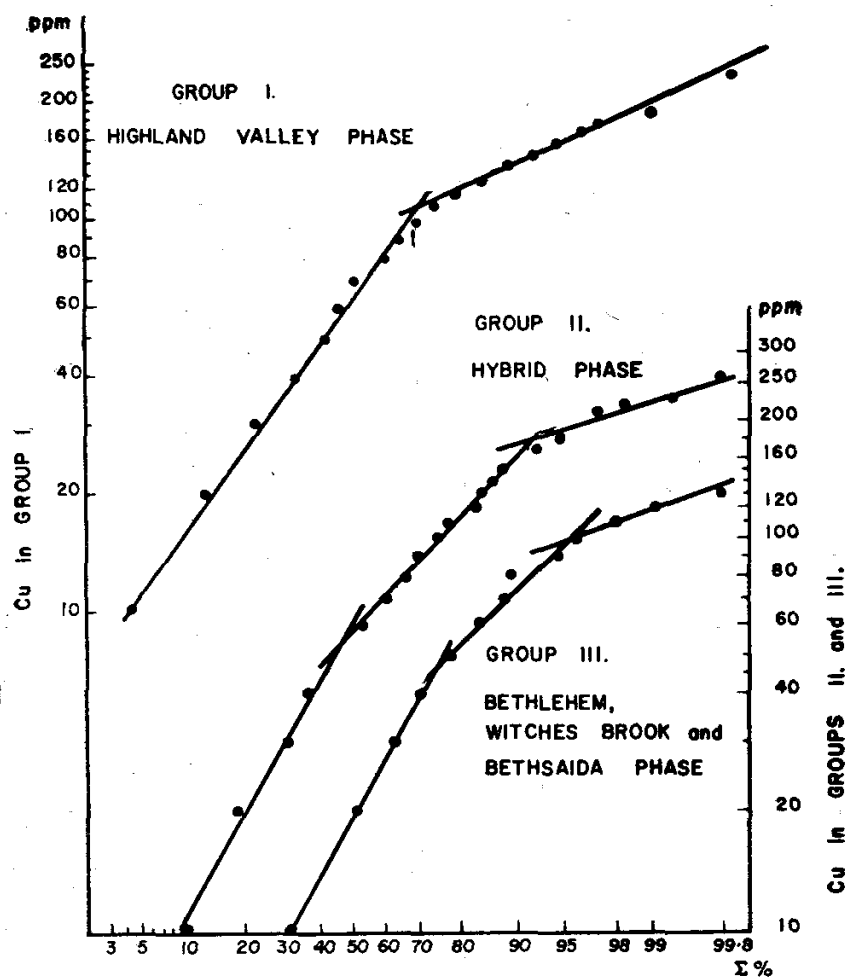
* Точность с уровнем достоверности 95%.

АА — атомно-абсорбционная спектрофотометрия.

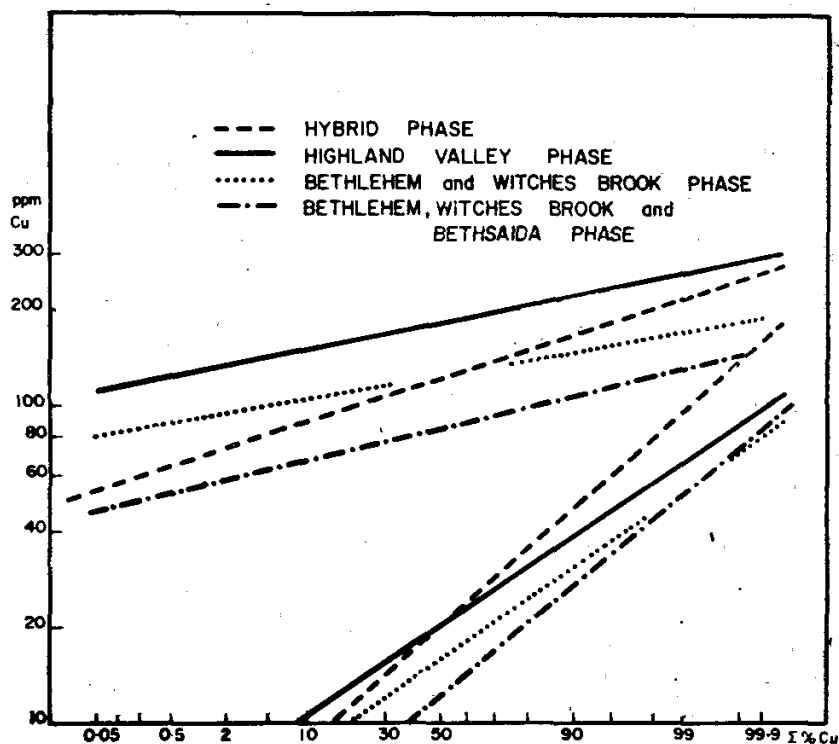
AR_x — количество металла, экстрагированное царской водкой.

¹ СААС — сиенит-1.

² СААС — сиенит-1, разбавленный в 4 раза свободным от серы кварцем.



ФИГ. 2. Распределение кумулятивных частот для концентраций меди.



ФИГ. 3. Составляющие совокупности содержаний меди в различных фазах гранитов.

содержания отдельных элементов. При анализе на серу и ртуть, а также при спектральных определениях точность оценивалась путем повторных анализов части выборочных проб. Данные о точности анализов приведены в табл. II.

Надежность определений, установленная по анализам стандартов пород, для меди равна $\pm 2\%$ и обычно несколько ниже 10% для других элементов по сравнению с опубликованными средними данными.

СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Распределение частот содержаний меди и цинка изучено путем построения графиков кумулятивных частот содержаний металла на вероятностной бумаге. Показано, что при многовершинном распределении наклонные кривые, полученные этим методом, имеют характерные перегибы [11, 7].

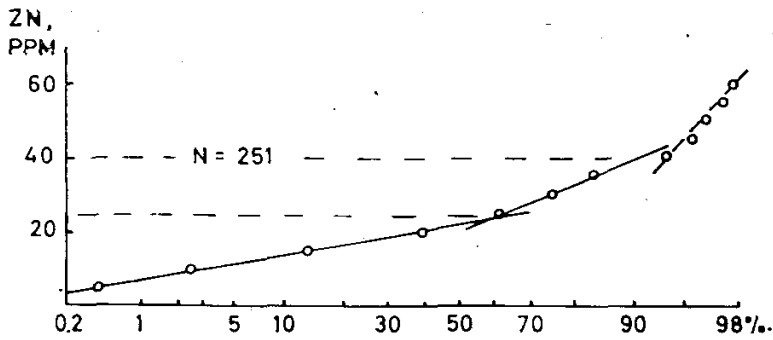
График кумулятивных частот для концентраций меди во всех породах батолита оказался сложным и трудным для интерпретации. По этой причине данные были разделены на три группы:

группа I — данные по фазе Хайленд-Валли,

группа II — данные по фазе Гибрид, группа III — данные по фазам Бетлехем, Уитчес-Брук и Бетсайда.

При такой группировке пород авторы руководствовались относительным возрастом фаз и количеством проб, необходимых для построения значащего графика частот. Полученные графики показывают наличие по крайней мере двух совокупностей данных (фиг. 2). Главные компоненты совокупностей нанесены на фиг. 3, где низкие содержания меди в породах фазы Бетсайда подчеркнуты путем нанесения на график III группы с данными по этой фазе и без них. Средняя часть графика для группы III (фиг. 2), вероятно, представляет смесь совокупностей с низкими и высокими содержаниями меди, а в группе II (фаза Гибрид) не исключена возможность и третьей совокупности. Хорошее приближение к прямой для концентраций меди на логарифмической вероятностной бумаге показывает, что составляющие совокупности этого элемента могут быть распределены логнормально.

Распределение содержаний цинка также свидетельствует о наличии двух совокупностей данных, которые в некоторой степени перекрываются (фиг. 4). Приближение графика к прямой линии для цинка проявляется лучше при



ФИГ. 4. Распределение кумулятивных частот для концентраций цинка.

нанесении на арифметическую вероятностную бумагу, чем на логарифмическую. Это может свидетельствовать о нормальном распределении цинка. Однако установление функции распределения — сложная проблема, особенно когда приходится иметь дело с неоднородным распределением, и проверка правдоподобия гипотезы с использованием критерия «хи-квадрат» в таких случаях мало что дает. В настоящей работе авторы не пытаются интерпретировать данные с этих позиций. Вид графиков кумулятивных частот и относительное расположение величин показывает, что предположение о логнормальном законе распределения для меди и нормальном для цинка может быть оправдано для оценки данных. Поэтому статистическая обработка выполнена для меди по логарифмам содержаний, а значения цинка оставлены неизменными.

Cu				Zn			
PRE-INTRUSIVE	N	G	S'	N	X	S	
PRE-INTRUSIVE	11	15	0.49	11	36	17.8	
HYBRID	93	57	0.47	75	31	14.2	
GUICHON	81	65	0.43	59	27	9.4	
CHATAWAY	35	43	0.33	21	25	14.2	
LE ROY	13	47	0.45	8	18	4.0	
GUMP LAKE	6	5	0.65	4	8	10.6	
BETHLEHEM	24	32	0.53	15	19	2.9	
WITCHES BROOK	44	42	0.49	28	17	6.7	
BETHSAIDA	34	10	0.51	25	22	10.4	
POST-INTRUSIVE	11	33	0.29	9	54	37.8	
ALL GRANITIC ROCKS	330	43	0.50	233	27	14.5	

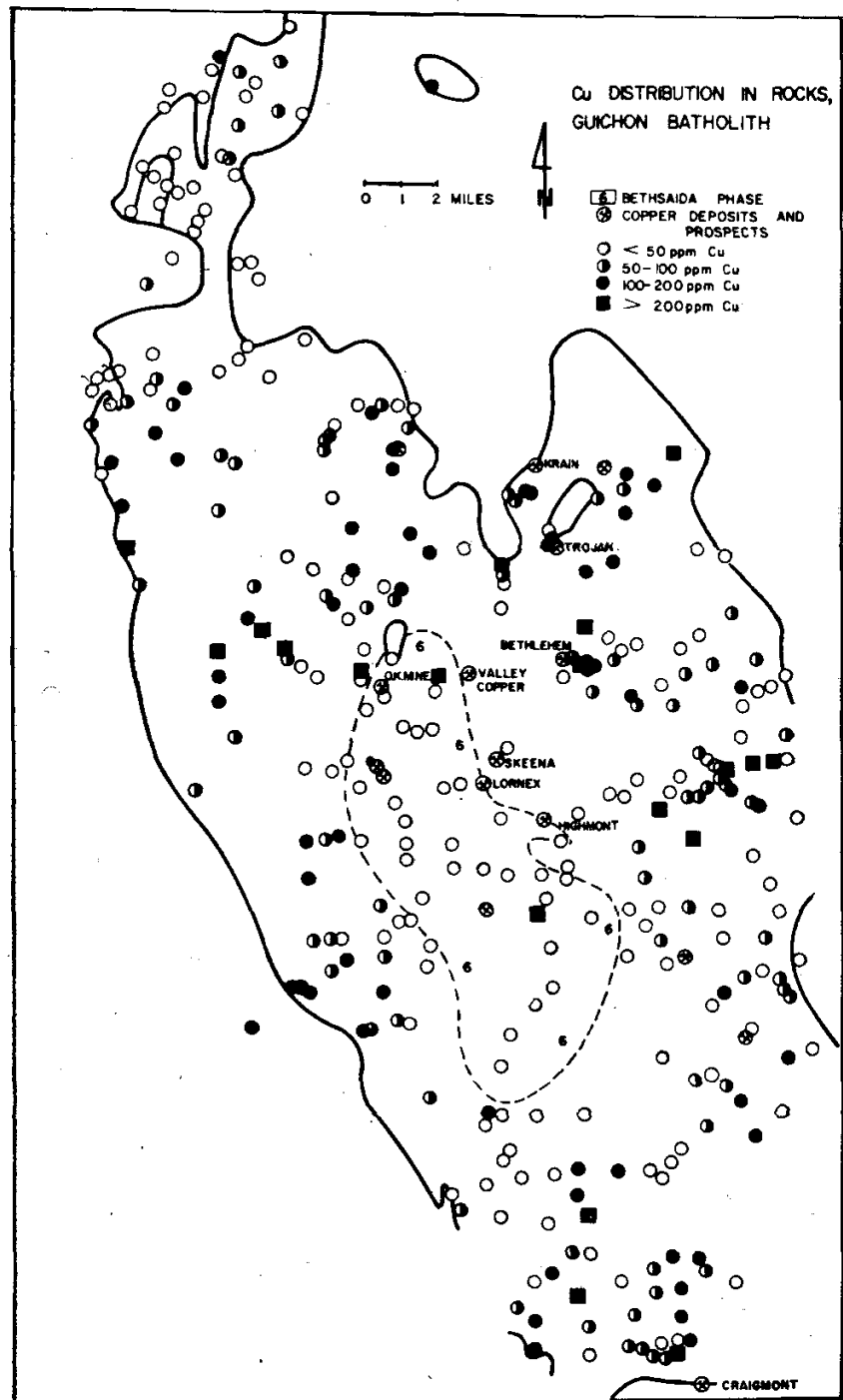
ФИГ. 5. Параметры распределения меди и цинка в различных типах пород.

Жирные линии показывают разброс величин. Точки представляют геометрическое среднее для меди (G) и арифметическое среднее для концентраций Zn (X); S и S' — стандартные отклонения, N — число проб.

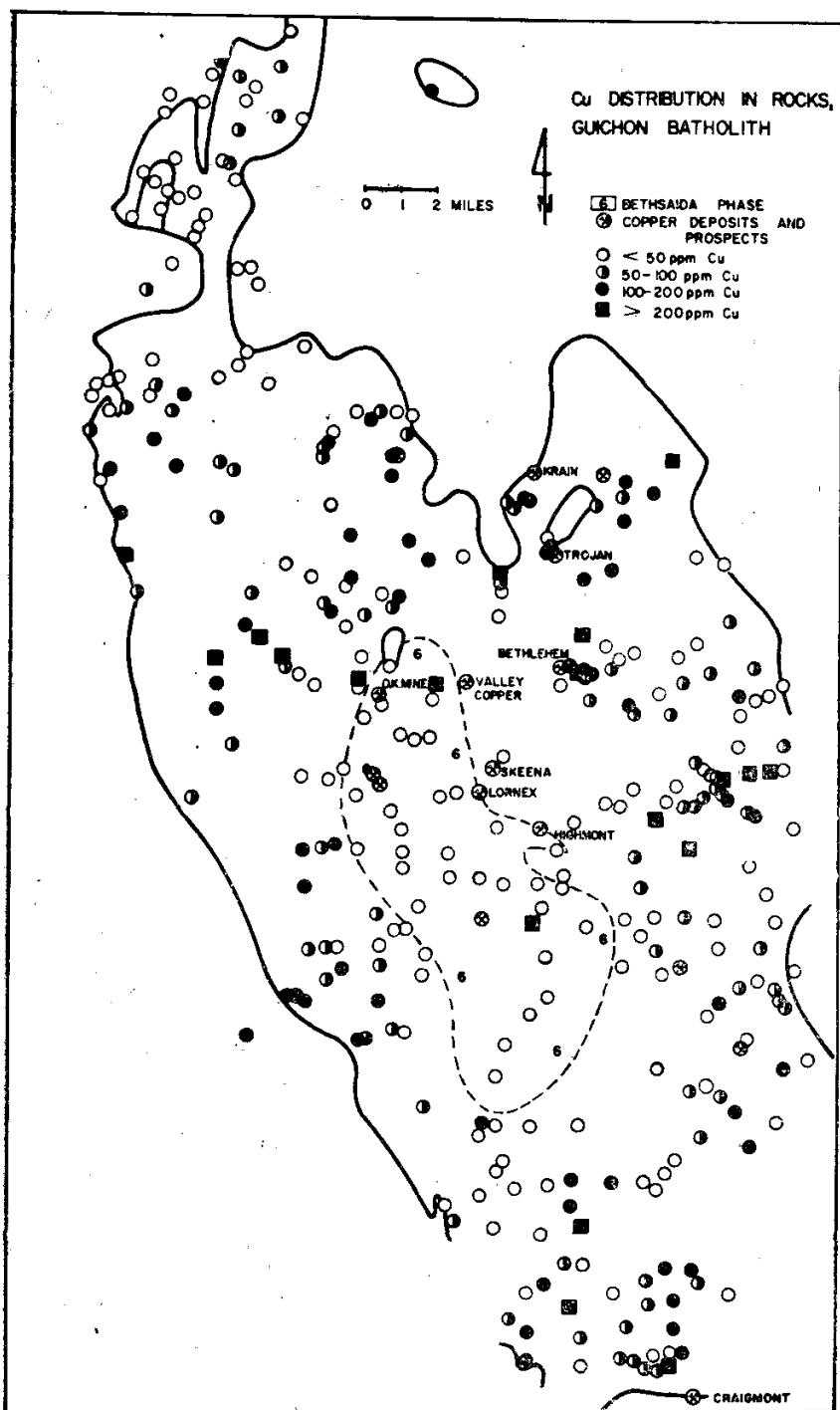
Распределение по площади. Значения средних и стандартных отклонений, а также диапазон колебаний содержаний меди и цинка во всех типах пород батолита Гуичон-Крик и в ассо-

цированных с ними породах показаны на фиг. 5. Характерен очень широкий разброс значений содержаний меди по сравнению с концентрациями цинка и очень низкие содержания обоих металлов в фазе Гамп-Лейк, для которой это различие достоверно, а не обусловлено малым количеством анализов. Низкие содержания металлов, петрографические отличия и краевое положение свидетельствуют о том, что тело Гамп-Лейк не является генетически частью батолита Гуичон-Крик. Норткуот предполагает, что оно может быть сателлитом другого батолита, расположенного в нескольких километрах восточнее.

Распределение меди и цинка на изученной площади показано на фиг. 6 и 7. Выбранные



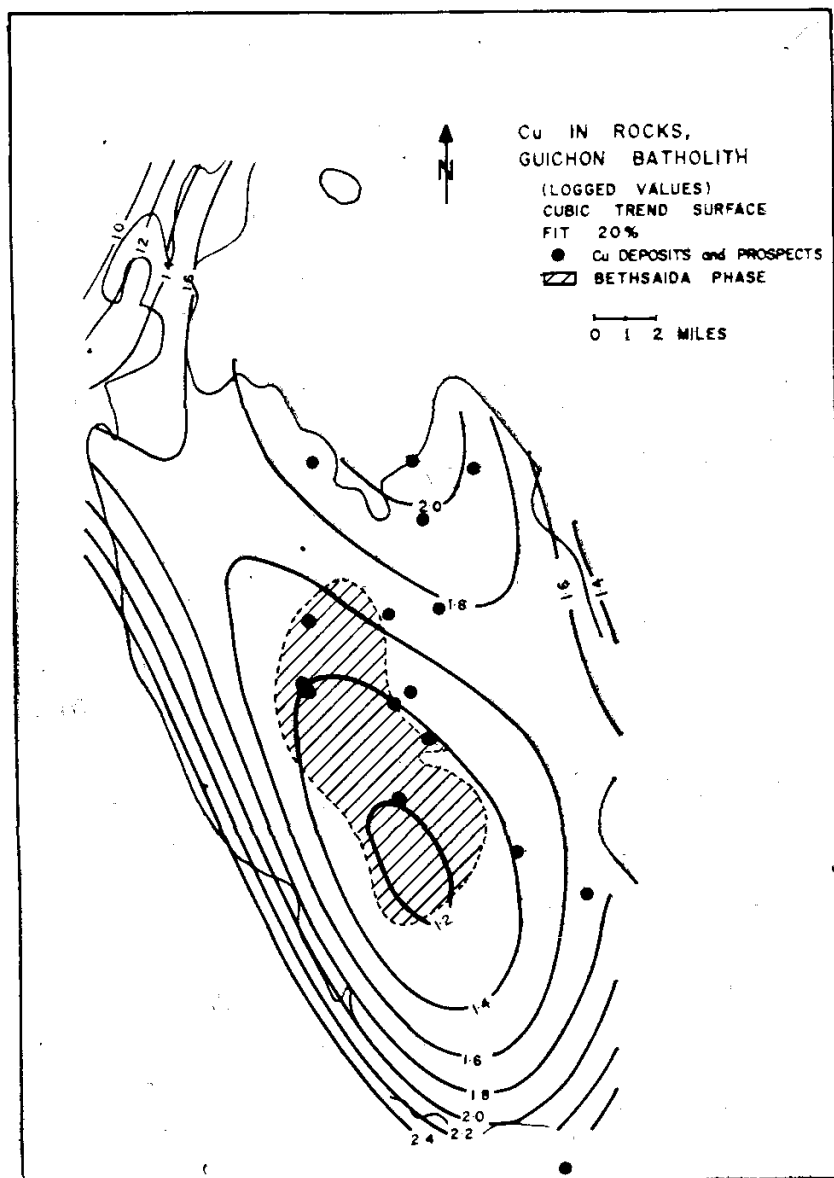
ФИГ. 6. Региональное распределение меди в породах батолита Гуичон-Крик.



ФИГ. 7. Региональное распределение цинка в породах батолита Гуичон-Крик.

интервалы концентраций соответствуют значениям перегиба на графиках кумулятивных частот (фиг. 2 и 4). Отличительной чертой регионального распределения меди является приуроченность низких содержаний к ядру батолита, а также к северо-западной части площади (фиг. 6). Содержание цинка имеет лишь слабую тенденцию к понижению от краевых частей батолита к внутренним (фиг. 7).

Сравнение содержаний металлов в главных типах пород. Чтобы определить, отличаются ли существенно по содержанию меди и цинка основные типы гранитных пород, данные были сгруппированы по фазам и разностям и проверены с помощью критерия t на различие средних содержаний. Для расчета выбрана под-



ФИГ. 8. Поверхность тренда меди (кубическая) для пород батолита Гуичон-Крик (логарифмированные величины, соответствие 20%).

ходящая формула для каждой пары геологических разновидностей в соответствии с различием между дисперсиями содержаний металлов в них, установленным предварительно по критерию F . Результаты сравнения средних приведены в табл. III

Различия между средними содержаниями в интрузивных фазах более резко выражены для меди, чем для цинка (достаточное число значимых различий 10 против 6). Число средних, отличающихся от среднего в породах каждой отдельной фазы (D в табл. III), обычно выше для меди, чем для цинка. Например, породы фазы Бетсайда отличаются по содержанию меди от пород всех других фаз, а по цинку только от двух.

Породы фаз промежуточного возраста, Бетлехем и Уитчес-Брук, имеют близкие содержания меди и цинка, но граниты фазы Бетлехем значительно отличаются от всех более древних фаз, а Уитчес-Брук — только от одной. Среди пород более древних фаз — особенно заметны

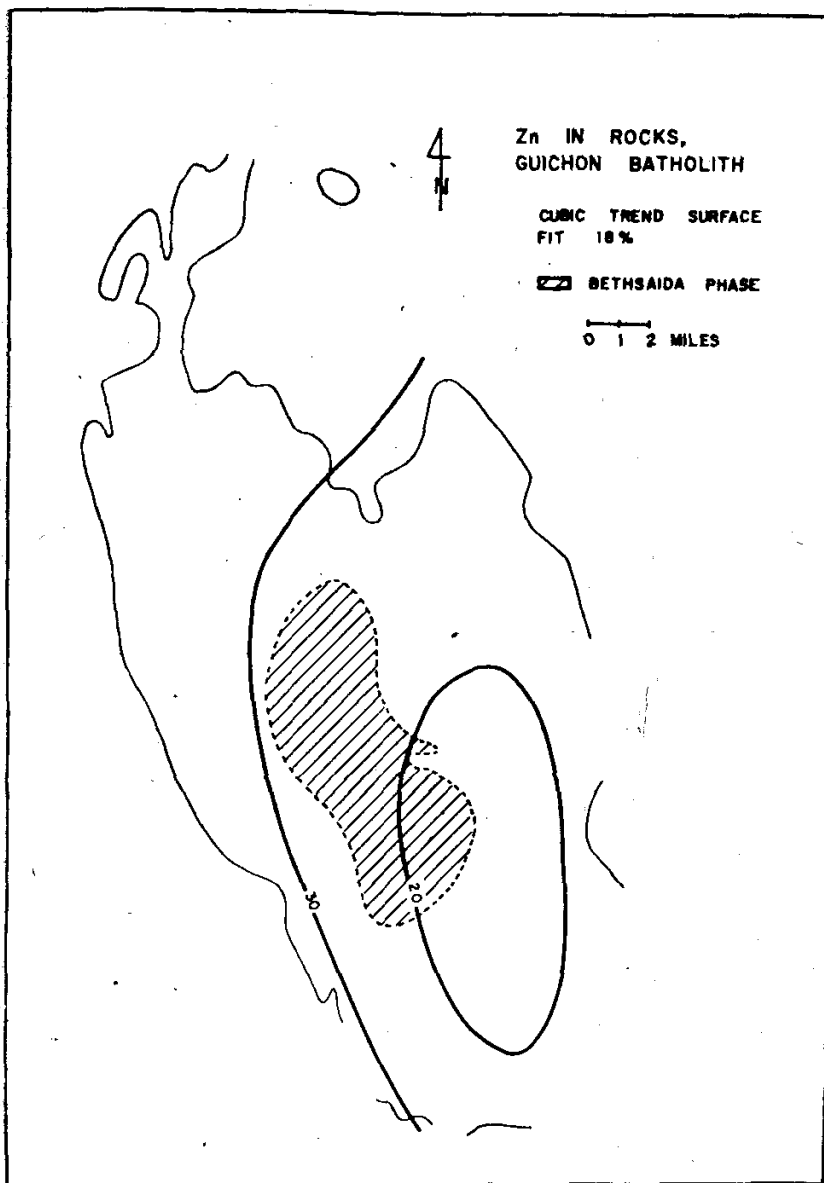
Статистическое сравнение средних различных интрузивных фаз
(по критерию t с уровнем значимости 0,05)

Типы пород	D(Cu)	Гибрид	Гуичон	Чатавей	Бетлехем	Уитчес-Брук	Бетсайда	D(Zn)
Фаза Бетсайда	5	S	S	S	S	S		2
Фаза Уитчес-Брук	2	*	S	*	*		*	2
Фаза Бетлехем	4	S	S	S			*	2
Фаза Хайленд-Валли								
Разновидности Чатавей	3	*		Медь Цинк	*	*	*	0
Разновидности Гуичон	4	*		*	S	S	S	3
Фаза Гибрид	2		*	*	S	S	S	3

D-число различающихся средних

S- значимое различие ($\alpha < 0,05$)

* незначимое различие при уровне значимости 0,05



ФИГ. 9. Поверхность тренда цинка (кубическая) для пород батолита Гуичон-Крик (соответствие 18%).

различия между разновидностями Чатавей и Гуичон в фазе Хайленд-Валли.

Тренд поверхности. Региональные колебания содержаний меди и цинка были выявлены из местных вариаций путем анализа трендов поверхности. Соответствие поверхностей исходным данным, выраженное через коэффициенты определенности, оказалось значительно выше для цинка, чем для меди. Полагают, что региональные тренды обоих металлов удовлетворительно аппроксимируются кубическими поверхностями (фиг. 8 и 9). Исключительно высокие содержания меди (свыше 800 млн⁻¹) не учитывались.

Уровни трендов поверхностей меди имеют преобладающую тенденцию к понижению по мере приближения к фазе Бетсайда, низкие содержания меди в которой подчеркиваются депрессией в средней части батолита. Такая же депрессия намечается в северо-западной части площади. Найдено, что все тренды поверхности меди, включая кубическую, имеют северо-западное направление длинных осей, грубо совпадающее с удлинением батолита (фиг. 8).

Тренды поверхности цинка относительно единообразны, со слабо проявленным понижением уровня к востоку от центра батолита. В отличие от меди кубическая поверхность тренда цинка имеет северное направление длинной оси (фиг. 9).

Соотношение меди и цинка с другими переменными изучено путем вычисления коэффициентов корреляции металлов в породах

Таблица IV

Значимая корреляция меди и цинка с другими переменными

Переменные	N	R	Уровень значимости
WrCu—WrZn	230	0,27	0,001
WrZn—WrFe	49	0,36	0,05
WrZn—WrMg	49	0,44	0,01
(151—1600 колебаний содержания Cu)*	16	0,76	0,001
WrCu—BiCu	21	0,86	0,001
WrCu—WrHg	53	0,49	0,001

N — количество проб; R — коэффициент корреляции; Wr — порода в целом; Bi — биотит; * — корреляция для более низких значений не обнаружена.

со следующими переменными: модами главных породообразующих минералов (по Норткоуту [8]); содержаниями Zn, Cu, Mg, Fe и Hg в породах; содержанием меди во фракциях биотита, смеси полевого шпата и кварца и магнетита. Все расчеты даны для логарифмов содержаний. Ввиду возможной ассоциации меди с серой корреляция между этими элементами была изучена в деталях путем группирования данных в соответствии с порядком содержания меди. Значимые коэффициенты корреляции приведены в табл. IV.

Интересно отметить, что коэффициенты корреляции между Zn — Mg и Zn — Fe для анализированных пород почти в два раза выше коэффициентов корреляции для Cu — Mg и Cu — Fe (число пар было то же).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Несмотря на то что генетическая ассоциация рудных месторождений с магматическим процессом издавна была основным правилом геологов-практиков, общепринятых критериев (петрологических или геохимических) для распознавания гранитных тел с высоким экономическим потенциалом не существует. После предварительного осмотра плутонов в южной части Британской Колумбии Уоррен и Делабот [12] пришли к эмпирическому заключению о том, что «положительные на медь» и «положительные на цинк» плутоны могут быть отделены от «пустых» плутонов так же, как и друг от друга по содержаниям меди и цинка, экстрагированным царской водкой, а также по отношениям металлов. По их схеме батолит Гуичон-Крик определенно относится к плутонам «положительным на медь» со средним геометрическим

содержанием меди 43 млн⁻¹ и арифметическим средним содержанием цинка 27 млн⁻¹.

Эти величины, полученные экстракцией с царской водкой, примерно соответствуют общему содержанию металла в 50 млн⁻¹ меди и 55 млн⁻¹ цинка. Сравнительные цифры для других подобных тел необычайно редки в литературе. Краускопф [2] приводит в качестве «средних» содержаний меди и цинка для гранитных пород промежуточного состава 30—35 млн⁻¹ и 60—72 млн⁻¹ соответственно. По сравнению с этими данными батолит Гуичон-Крик оказывается несколько богаче медью и беднее цинком. Возможно, такие различия незначительны, поскольку, как указывает Краускопф [2], любое гранитное тело содержит большое количество металлов в рассеянном виде, достаточное для формирования рудных месторождений.

Источник меди в этом и других мезозойских плутонах канадских Кордильер является объектом построения многочисленных гипотез, но изучен мало. Наиболее общепринято мнение о том, что источником Cu служат интродуцированные верхнетриасовые вулканические породы, из которых медь извлекалась либо в процессе полного переплавления, либо посредством какого-то другого процесса. Среди прочих эту концепцию поддерживает Шоу [10], приводящий анализы 48 проб базальтов, собранных на площади выходов верхнетриасовых пород в 36 км восточнее батолита Гуичон-Крик со средним арифметическим содержанием меди 75 млн⁻¹. Но геометрическое среднее по 33 анализам [9] составляет только 35 млн⁻¹, т. е. ниже, чем в батолите. Рассмотрение первичных отношений Rb/Sr, полученных в окрестностях рудника Креймон, привело Крисмаса и др. [4] к предположению, что источником вещества батолита являются глубинные части земной коры или мантия (хотя, возможно, содержащиеся в нем тяжелые металлы могли быть заимствованы на каких-то более высоких уровнях земной коры).

Результаты этого исследования способствовали выяснению вопроса об источнике тяжелых металлов. Небольшое количество проанализированных боковых пород имеют сравнительно низкие содержания меди, и в породах периферической фазы Гибрид нет заметного обогащения этим металлом по сравнению с другими фазами. А это единственная гранитная фаза, которая явно изменена в процессе ассимиляции вмещающих пород. Однако, возможно, не столь важны основной источник и первичное содержание металла в процессе его эпигенетической концентрации, как его поведение в магматическом процессе.

Как указывалось ранее в этой работе, медь могла отчасти играть активную роль в магматической истории батолита. Она неравномерно распределена между различными интрузивными фазами и может прекрасно существовать по крайней мере в двух различных формах: связанной и летучей.

Можно ли заметно поднять пониженные содержания меди в фазе Бетсайда до среднего уровня за счет материала залегающих в ней эпигенетических месторождений меди? Например, если общее количество меди, оцениваемое здесь в 25 млн. т, было распределено в породах фазы Бетсайда до глубины 1650 м, содержание меди в этой фазе увеличилось бы до средней геометрической величины. Это делает рабочую гипотезу достойной рассмотрения. Купол Бетсайда с его ореолом даек порфиров и трубок брекчий поднялся до такого уровня земной коры, что его внутреннее давление летучих превысило давление нагрузки. Летучие компоненты, часть которых составляли подвижные соединения меди, могли затем мигрировать в уже консолидированные и трещиноватые породы, формируя месторождения медных руд.

Относительная растворимость меди и цинка в царской водке и их соотношение с железом и магнием предполагают существование различия между этими металлами по формам их нахождения. Одной из причин такого поведения может быть общеизвестное предпочтительное вхождение меди в сульфидные фазы. Ионные радиусы и Cu, и Zn близки к таковым у Mg^{2+} и Fe^{2+} ($Cu^{2+} = 0,72 \text{ \AA}$; $Zn^{2+} = 0,74 \text{ \AA}$; $Mg^{2+} = 0,66 \text{ \AA}$; $Fe^{2+} = 0,74 \text{ \AA}$). Но вследствие более высокой электроотрицательности вхождение меди в структуру железо-магнезиальных силикатов по сравнению с цинком затруднено. Кроме того, когда соответствующее поступление серы в период кристаллизации пород недостаточно, большая часть меди может остаться в элементарной форме. Плохая общая корреляция между медью и серой в гранитных породах батолита Гуичон-Крик подтверждает эту возможность. Таким образом, относительно мобильная форма, в которой медь существовала в этих породах, могла быть важным фактором при образовании рудных месторождений на этой площади.

Значимая корреляция между медью и таким летучим компонентом, как ртуть, представляет

интерес в качестве возможного индикатора влияния глубины внедрения интрузии на региональное распределение меди.

Результаты настоящего исследования показывают, что в сложных гранитных интрузиях высокое содержание меди в отдельной интрузивной фазе не служит достаточным признаком ее высокого рудного потенциала. Так, ввиду систематических колебаний в содержаниях меди внутри подобных интрузивных тел уровень фоновых содержаний меди и в породах, и в перекрывающих их отложениях будет изменяться от участка к участку.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Barringer A. R.*, Interference-Free Spectrometer for High-Sensitivity Mercury Analysis of Soils, Rocks and Air, Trans. Inst. Min. Metall., Section B, 75, 120—124, 1966.
2. *Barnes H. L.*, Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits, Holt, Rinehart and Winston Inc., New York, 670, 1967.
3. *Brabec D.*, Aqua-Regia-Extractable versus Total Copper and Zinc Content of Granitic Rocks, AIME Annual Meeting, Denver, Colo., Preprint № 70-L-84, 1970.
4. *Christmas L.*, et al., Rb/Sr, S and O Isotopic Analysis Indicating Source and Date of Contact Metasomatic Copper Deposits, Craigmont, B.C., Canada, Econ. Geol., 64, № 5, 479—488, 1969.
5. *Craven C. A. V.*, Statistical Estimation of the Accuracy of Assaying, Trans. Inst. Min. Metall., 63, 551—563, 1953.
6. *Leco* (Laboratory Equipment Corp., St. Joseph, Michigan), Application Sheets, 1966.
7. *Lepeltier C.*, A Simplified Treatment of Geochemical Data by Graphical Representation, Econ. Geol., 64, № 5, 538—550, 1969.
8. *Northcote K. E.*, Geology and Geochronology of the Guichon Creek Batholith, B.C. Dept. of Mines Bull., № 56, 73, 1969.
9. *Schau M. P.*, Geology of the Upper Triassic Nicola Group in South-Central B.C., unpublished Ph. D. thesis, University of British Columbia, Vancouver, B.C., 1968.
10. *Schau M. P.*, Discussion on Rb/Sr and O Isotopic Analyses Indicating Source and Date of Contact Metasomatic Copper Deposits, Craigmont, B.C., Canada, by Christmas et al., Econ., Geol., 65, № 1, 62—63, 1970.
11. *Tennant C. B.*, *White M. L.*, Study of the Distribution of Some Geochemical Data, Econ. Geol., 54, 1281—1290, 1959.
12. *Warren H. V.*, *Delavault R. E.*, Aqua-Regia-Extractable Copper and Zinc in Plutonic Rocks in Relation to Ore Deposits, Trans. Inst. Min. Metall., 69, 495—504, 1959—1960.

ИЗУЧЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РУДНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ПОРОДАХ ДЛЯ ОЦЕНКИ РУДОНОСНОСТИ. НИКЕЛЬ, МЕДЬ, КОБАЛЬТ И СЕРА В УЛЬТРАОСНОВНЫХ ПОРОДАХ КАНАДСКОГО ЩИТА

Э. М. Камерон,
Г. Сиддли, С. С. Дархэм
Геологическая служба Канады,
Оттава

ВВЕДЕНИЕ

В статье Камерона и Барагара (стр. 302) сравниваются частоты распределения содержания меди в двух группах вулканических пород. Для пород одной группы характерна медная минерализация, образовавшаяся, видимо, путем сегрегации сульфидов меди в базальтовой магме. В породах второй группы такая минерализация отсутствует. Другой тип месторождений, который многими исследователями рассматривается как образовавшийся путем сегрегации сульфидов в магме, представлен медно-никелевыми рудами, ассоциирующими с ультраосновными породами. Они образуют важный для промышленности тип месторождений. В настоящей статье сравнивается распределение элементов, образующих сульфидные компоненты в рудоносных и безрудных ультраосновных породах.

Методы исследований, результаты которых излагаются в этих двух статьях, совершенно различны. Три района развития вулканических пород, изученные Камероном и Барагаром, опробованы со средней и высокой степенью плотности. Для выполнения настоящего исследования проведено рекогносцировочное опробование очень большого количества тел ультраосновных пород, разбросанных на обширной части Канадского щита и прилегающих к нему областях. Такой подход определяется отчасти геологическими соображениями. В пределах вулканических поясов Коппермайн-Ривер и Иеллоунайф породы, выходящие на поверхность, по всей вероятности, хорошо представляют исходную магму. В свою очередь пробы, отобранные из них для анализа, в достаточной степени представительны для пород, обнаженных на поверхности. Напротив, многие тела ультраосновных пород в пределах Канадского щита малы по размерам и плохо обнажены. Например, по линии Вабоден — озеро Моак (часть пояса Томпсон) расположено более 200 тел ультрабазитов, из которых обнажены только три [11]. Таким образом, маловероятно, что пробы, которые удалось отобрать из обнаженных участков этих тел в процессе рекогносцировочных исследований, были представительны для исходной магмы. Поэтому нельзя надеяться,

что построение кривых распределения, как это было сделано для группы Коппермайн-Ривер, позволит выявить вынос сульфидного компонента в отдельных порциях магмы, компенсирующийся ее обогащением в других участках. Следовательно, задачи, поставленные перед этим исследованием, не могут быть строго количественными. В нем проведено широкое сравнение содержания сульфидов в телах ультраосновных пород, с которыми ассоциируют или не ассоциируют медно-никелевые руды.

В СССР выполнено значительное количество работ, посвященных геохимическому различию никеленосных и безрудных основных и ультраосновных серий. Обнадеживающие результаты исследований Годлевского [9], Полферова [16], Волкова [28], Полферова и др. [17], Полферова и Суловой [18], отметивших, в частности, обогащение минерализованных серий рядом микроэлементов, побудили авторов предпринять подобную работу в Канаде.

В образцах определялись содержания меди, никеля, кобальта и серы. Поскольку целью настоящего исследования было изучение частот распределения сульфидного компонента магмы, особое внимание уделялось использованию аналитического метода, с помощью которого часть меди, никеля и кобальта, связанная в сульфидах, отделялась от этих элементов, содержащихся в силикатах.

МЕДНО-НИКЕЛЕВЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ В УЛЬТРАОСНОВНЫХ ПОРОДАХ КАНАДСКОГО ЩИТА

В связи с важным экономическим значением медно-никелевые сульфидные руды, ассоциирующие с телами ультрабазитов в пределах Канадского щита, явились объектом детальных исследований, многие из которых, к сожалению, не опубликованы. К наиболее современным работам относятся сводки Маккензи [14] и Килбарна и др. [11], а также отчет Корнуола [6], охватывающий все месторождения Северной Америки.

На медно-никелевых месторождениях в пределах Канадского щита наблюдаются все стадии сегрегации и миграции их сульфидных

компонентов. На одних месторождениях сульфиды остаются тонкораспыленными в массе ультраосновной породы, на других произошло обособление сульфидного компонента с образованием зон высококачественных руд, а в некоторых случаях сульфидный материал удалялся из материнской ультраосновной массы, внедряясь в прилегающие вмещающие породы. На степень сегрегации и миграции сульфидов, конечно, оказывает влияние тип ультраосновного массива и его геологическая история. Килбарн и др. [11] выделили три общих типа ультраосновных пород, вмещающих сульфидные месторождения, два из которых имеют большое значение для Канады. К первому типу отнесены ультраосновные породы, интродуцирующие вдоль зон крупных разломов земной коры. Пояс Томпсон Канадского щита, протягивающийся на 160 км вдоль границы между провинциями Черчилл и Суперьюр, служит хорошим эталоном этого *орогенного* типа. Второй тип *вулканический*, — представлен согласно залегающими силлами или дайками, распространенными в вулканических поясах. Этот тип ультраосновных пород широко развит в архейских зеленокаменных поясах северо-восточного Онтарио и прилегающей территории Квебека. Сульфиды меди и никеля в ультраосновных силлах щита в результате гравитационной дифференциации обычно отлагались в виде пластов и линз у подошвы силла и в некоторых случаях проникали во вмещающие породы у его лежащего контакта. Сегрегация такого типа менее характерна для массивов, которые внедрились вдоль орогенных поясов. Эти массивы чаще содержат рассеянные руды, хотя месторождение Томпсон может служить прекрасным примером рудных тел, которые инъецированы во вмещающие породы. Отражающие относительно слабое проявление процессов сегрегации, ультраосновные породы в массивах орогенических поясов более однородны, чем породы массивов, внедренных вдоль вулканических поясов. В этих массивах часто можно наблюдать дифференциацию на основные и ультраосновные породы. Ультраосновные породы обоих типов обычно серпентинизированы в большей или меньшей степени.

Гипотеза магматической сегрегации для многих медно-никелевых месторождений Канадского щита как будто не вызывает сомнения. Однако Салливан [26], Вилсон и Брисбин [30], Каллеруд и Йодер [12] и Налдрет [15] представили доказательства того, что некоторые месторождения могли образоваться путем сульфуризации ультраосновных пород. Для понимания этого процесса важно учесть халькофильный характер элементов, принимающих в нем

участие. Гольдшмидт [10] приводит эти элементы в следующем порядке по возрастанию их халькофильности: железо, никель, кобальт, медь. В процессе кристаллизации ультраосновных пород железо, никель и кобальт способны входить и в силикаты, и в сульфидные минералы. При отсутствии серы они могут полностью рассеиваться в силикатных минералах. В противоположность этим элементам медь настолько халькофильна, что она входит в виде примеси в железо-магнезиальные силикаты с трудом. В результате медь может концентрироваться после кристаллизации основной магмы в виде остаточной сульфидной жидкости, богатой медью [29]. Если сера привносится в частично или полностью раскристаллизованную ультраосновную породу, которая ранее содержала лишь малое количество серы, сульфиды образуются путем реакции серы с силикатами, содержащими железо, никель и кобальт, главным образом с оливином. В присутствии ограниченных количеств серы сульфиды никеля и кобальта будут преобладать над сульфидами железа благодаря более халькофильному характеру первых двух металлов. После образования богатых никелем сульфидов, рассеянных в ультраосновной породе, должен действовать какой-то механизм, ведущий к их концентрации в руду. Подобные руды, если они действительно существуют, будут иметь тенденцию к низкому медно-никелевому отношению, по всей вероятности, аналогичному наиболее ранней генерации сульфидов, отложенных из магмы [29, 4].

ОПРОБОВАНИЕ УЛЬТРАОСНОВНЫХ ПОРОД

Пробы, использованные в этой работе, были собраны Сиддли для более широкого изучения общего содержания главных и сопутствующих элементов в ультраосновных породах щита и прилегающих областей. Для этого исследования 1079 проб коренных пород были сгруппированы по 61 участку. Некоторые участки представлены пробами только по одному массиву ультраосновных пород, другие охарактеризованы пробами, отобранными из нескольких массивов. Таким образом, некоторые участки представляют несколько сотен или тысяч метров разреза по ультраосновным породам одного тела, другие могут объединять тела, разбросанные на расстоянии в несколько десятков километров. Оценка максимального расстояния между пробами для каждого участка, а также данные о природе массивов и способе их опробования даны в табл. I. Географическое положение проб показано на фиг. 1.

Номера на карте	Участки	Геологические провинции	Типы интрузий	Особенности строения тел	Характеристика опробованных пород	Сульфидная минерализация	Характер минерализации	Наибольшее расстояние между образцами, км
1	Восточные районы (Квебек)	Аппалачская	Пластовые силлы	Однородные тела или простые дифференциаты	Асбестовидный серпентинит, образовавшийся из дунита и перидотита	Не известна		240
2	Истери-Металс-Проспект (восточные районы)	Аппалачская	Пластовый силл	Однородное тело или простой дифференциат	Серпентинит, образовавшийся из дунита и перидотита	Массивный халькопирит	Трещинные зоны во вмещающих породах около контакта их с ультрабазитами	0,8
3	Парри-Саунд — Хантсвилл (Онтарио)	Гренвилл	Штоки диаметром меньше 400 м		Серпентинизированный перидотит и гарцбургит	Незначительная сульфидная минерализация		48
4	Район Страти (Онтарио)	Суперьюр	Эллиптический шток, выклинивающийся на глубине		Серпентинизированный перидотит, слабые оталькование и хлоритизация	Халькопирит, пирротин, пентландит, пирит	Рассеянное и в виде штокверков около северного контакта в «языке ультрабазитов»	1,5
5	Район Мак-Элрой и Скид (Онтарио)	Суперьюр	Пластовые силлы		Мелкозернистый серпентинизированный перидотит	Незначительное количество сульфидов	Сульфиды вблизи контактов	20
6	Районы Пакод и Бостон (Онтарио)	Суперьюр	Пластовые силлы		Серпентинизированный перидотит	Не известна		3
7	Районы Каиро и Пауэлл (Онтарио)	Суперьюр	Линзовидные силлы		Мелкозернистый до афанитового серпентинизированный перидотит	Не известна		10
8	Район Рокмор (Онтарио)	Суперьюр	Линзовидные силлы		Серпентинизированный перидотит	Не известна		3
9	Район Мидлотиан (Онтарио)	Суперьюр	Линзовидные силлы		Серпентинизированные дунит и перидотит	Не известна		3
10A	Рудный силл Лангмюр (Онтарио)	Суперьюр	Линзовидный силл	Дифференцирован на габброидные и ультраосновные породы	Серпентинизированный перидотит, оталькование и карбонатизация	Пирит, пентландит, пирротин, миллерит	Рассеянное в серпентинитах около нижнего контакта	0,8
10B	Безрудный	Суперьюр	Линзовидный		Серпентинизирован-	Не известна		1,5

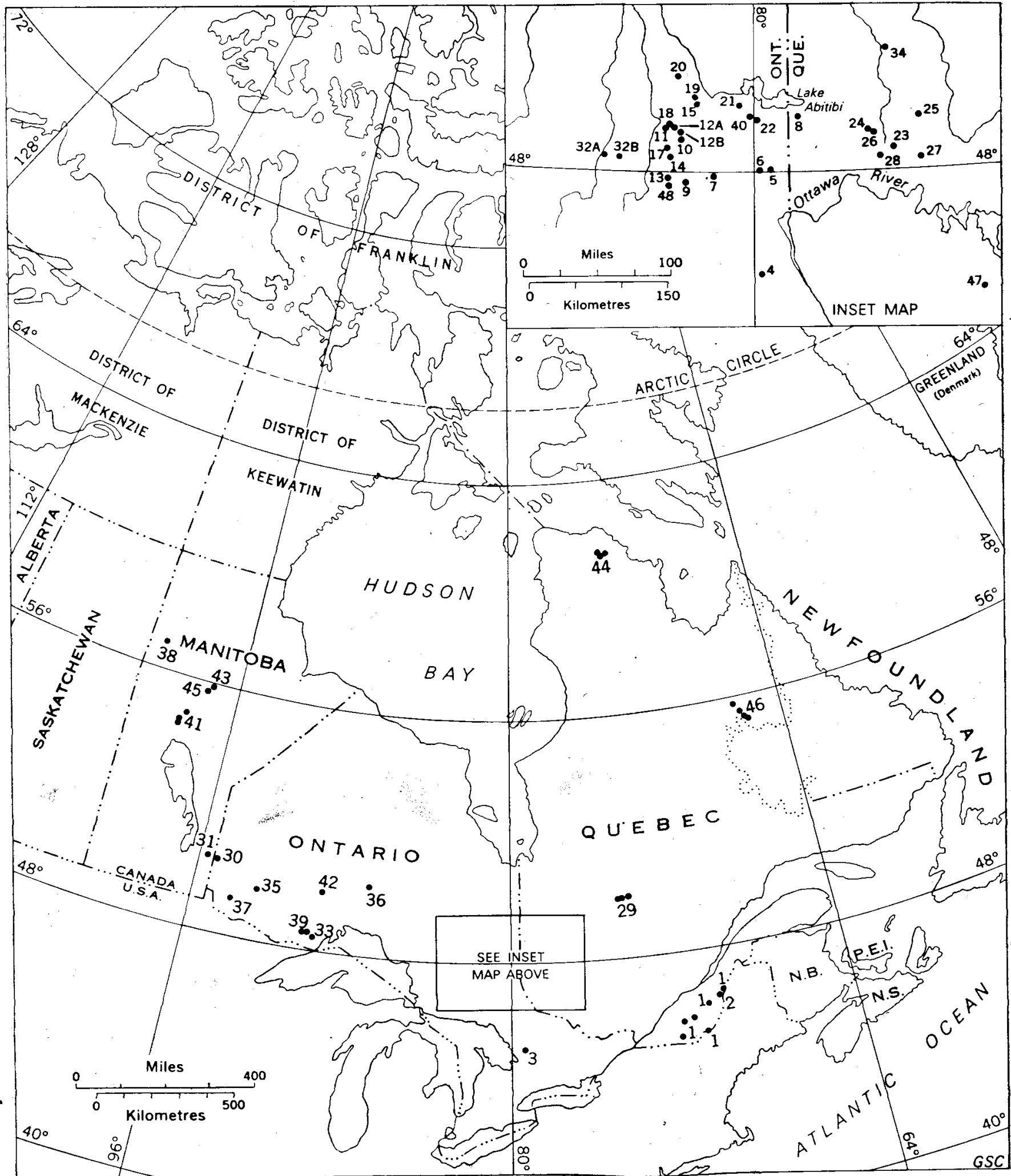
	силл Лангмюр		силл		ный перидотит, оталькование и карбонатизация			
11	Район Делоро (Онтарио)	Суперьюр	Линзовидные силлы и дайки		Серпентинизированный перидотит и тальк-хлоритовый сланец	Не известна		6,5
12A	Район Шоу (Онтарио)	Суперьюр	Линзовидные силлы		Серпентинизированные дунит и перидотит	Не известна		5
12B	Район Карман (Онтарио)	Суперьюр	Линзовидные силлы		Серпентинизированные дунит и перидотит	Не известна		5
13	Район Семпл (Онтарио)	Суперьюр	Линзовидные силлы и дайки		Тальковый, хлоритовый и асбестовидный серпентиниты и серпентинизированный перидотит	Не известна		1,5
14	Рудник Тексмонт (Онтарио)	Суперьюр	Эллиптическое силлообразное тело	Некоторая дифференциация на габброиды и ультрабазиты	Серпентинизированный перидотит с участками оталькования	Пентландит, пирит, редкий халькопирит	Рассеянное в вертикальных линзах ультрабазитов, лежащих уступами к простиранию тела	2,5
15	Рудник Алексо (Онтарио)	Суперьюр	Силл	Некоторая дифференциация на габброиды и ультрабазиты	Серпентинизированный перидотит	Пентландит, пирротин, халькопирит, хизлевудит	Массивные и рассеянные руды около лежащего контакта тела ультрабазитов	3
17	Район Мак-Артур (Онтарио)	Суперьюр	Силл		Очень мелкозернистый серпентинизированный перидотит	Не известна		3
18	Район Тисдал (Онтарио)	Суперьюр	Линзовидный силл		Мелкозернистый серпентинизированный перидотит, иногда оталькование	Не известна		2,5
19	Район Мак-Карт (Онтарио)	Суперьюр	Силл		Серпентинизированный перидотит	Очень незначительная сульфидная минерализация		1,5
20	Район Ром (Онтарио)	Суперьюр	Силл		Серпентинизированные дунит и перидотит, иногда оталькование	Не известна		6,5

Номера на карте	Участки	Геологические провинции	Типы интрузий	Особенности строения тел	Характеристика опробованных пород	Сульфидная минерализация	Характер минерализации	Наибольшее расстояние между образцами, км
21	Район Мунро (Онтарио)	Суперьор	Три силла	Однородное строение до полосчатого, габбро и ультрабазиты	Серпентинит, серпентинизированный перидотит, пироксенит	Небольшое количество никельсодержащего пирротина		8
22	Район Гаррисон (Онтарио)	Суперьор	Силл	Габброидный дифференциат	Асбестовидный серпентинизированный дунит и перидотит	Редкий пирротин		2,5
23	Район Вассан (Квебек)	Суперьор	Разбросанные штокообразные тела	Частичное расслоение, однородные тела	Серпентинизированные перидотит и пироксенит, частично изменены в тальк-хлорит-тремолитовые сланцы	Не известна		2,5
24	Район Прейсак (Квебек)	Суперьор	Вытянутый шток или силл		Тальк-хлоритовые породы, серпентинизированный перидотит, тремолитовый пироксенит	В 8—13 км от рудника Марбридж, в том же массиве ультрабазитов		5
25	Район Карпентьер (Квебек)	Суперьор	Силл		Серпентинизированные дунит и перидотит	Не известна	См. рудник Марбридж	3
26	Рудник Марбридж (Квебек)	Суперьор	Вытянутый шток или силл		Серпентинит, серпентинизированный перидотит, тальковый перидотит, тальк-хлоритовый сланец, тремолитовый пироксенит	Миллерит, пирротин, пентландит, пирит	Массивные руды в ультрабазитах на контакте и во вмещающих породах	4
27	Район Лувикур (Квебек)	Суперьор	Эллипсоидный шток или силл		Серпентинизированный дунит и перидотит	Не известна		0,8
28	Район Малартик (Квебек)	Суперьор	Тело в разломе	Вероятно, однородное строение	Тальковый, тальк-хлоритовый сланец, тремолитовый перидотит; карбонатизация	Не известна		11
29A	Озеро Бурбо (Квебек)	Суперьор	Силлы	Неоднократное переслаивание перидотитов, пироксенитов и дунитов	Серпентинизированные перидотит, дунит и пироксенит	Не известна		1,5
29B	Озеро Антуанетта (Квебек)							

29C	Север озера Шибугамо (Квебек)	То же	То же	То же	То же	То же	То же	
30	Озеро Вернер и Гордон (Онтарио)	Суперьор	Линзы и вертикальные залежи в зоне разлома	Первоначально однородное, некоторое рассланцевание и образование пегматитов на контакте	Тремолитовый перидотит, тремолитовый пироксенит	Массивный и рассеянный пирротин, пентландит, халькопирит, небольшого кобальтина	Рассеянное в интрузии или концентрированное около контакта; в трещинах около тела	11
31	Бёрд-Ривер (Манитоба)	Суперьор	Расслоенный силл	Дифференцированный силл с перидотитами и анортозитовыми габбро	Хлоритизированный, серпентинизированный перидотит и тремолитовый пироксенит	Массивный пирротин, пентландит, халькопирит и кубанит	В трещиноватых зонах на контакте силла с вулканическими породами и под ним	5
32A	Район Ривес (Онтарио)	Суперьор	Силл		Серпентинизированные дунит и перидотит, иногда асбестовидные	Не известна		2,5
32B	Район Кеногаминг (Онтарио)	Суперьор	Силл		Серпентинизированный перидотит	Незначительное количество пентландита	Рассеянное в ультрабазитах	3
33	Район Адриан (Онтарио)	Суперьор	Силл (?)	Очень однородное тело, около контактов пироксениты	Серпентинизированный перидотит	Не известна		5
34	Район Мезеретс (Квебек)	Суперьор	Силл		Серпентинизированные перидотит и дунит	Не известна		20
35	Район Драйден (Онтарио)	Суперьор	Шток	Первичная зональность (?), вторичное изменение и сдвиг	Гарцбургит, серпентинизированный перидотит; оталькование	Не известна		1,5
36	Область Накина (Онтарио)	Суперьор	Силл		Очень мелкозернистый серпентинизированный перидотит	Не известна		3
37	Озеро Какаги (Онтарио)	Суперьор	Силл		Серпентинизированный дунит и перидотит, в подчиненных количествах пироксенит и тальк-хлоритовый сланец	Не известна		6,5
38	Линн-Лейк (Манитоба)	Черчилл	Штоки	Очевидно, расслоенная интрузия габбро с фациями ультрабазитов	Тремолитовый пироксенит, тремолитовый перидотит, серпентинизированный дунит	Массивные и рассеянные руды, состоящие из пирротина, пентландита, халькопирита и пирита	Рудные тела в западной части вблизи контакта массива	1,5

Номера на карте	Участки	Геологические провинции	Типы интрузий	Особенности строения тел	Характеристика опробованных пород	Сульфидная минерализация	Характер минерализации	Наибольшее расстояние между образцами, км
39A	Северный силл озеро Шебандован (Онтарио)	Суперьюр	Силл		Серпентинизированный перидотит, карбонатизация	Массивный, иногда рассеянный пентландит, пирротин, халькопирит, пирит и полидимит	Руды находятся в трещиноватой зоне в перидотитах и вмещающих породах	2,5
39B	Центральный и южный силлы озеро Шебандован	Суперьюр	Силлы		Серпентинизированный перидотит, карбонатизация	Не известна (?)		6,5
40	Район Мак-Кул (Онтарио)	Суперьюр	Силл	Дифференциат габбро	Серпентинизированные дунит и перидотит	Не известна		9
41A	Харгрейв-Ривер (Манитоба)	Граница провинций Черчилл и Суперьюр	Линзовидный силл		Серпентинит, серпентинизированные дунит и перидотит	Не известна		10
41B	Рестинг-Лейк (Манитоба)	Граница провинций Черчилл и Суперьюр	Линзовидный силл		Серпентинит, серпентинизированный дунит и перидотит	Не известна		3
41C	Рудный силл Буско (Манитоба)	Граница провинций Черчилл и Суперьюр	Дискордантный силлообразный массив		Серпентинит, тальковый сланец	Рассеянный пентландит и пирротин	Рассеянное по зонам в ультрабазах	менее 1,5
41D	Безрудный силл Буско (Манитоба)	Граница провинций Черчилл и Суперьюр	Дискордантный силл		Серпентинит	Не известна		менее 1,5
42	Падди-Лейк (Онтарио)	Суперьюр	Линзовидный силл		Серпентинит, тальк-хлоритовый сланец, серпентинизированный пироксенит	Незакономерное рассеяние миллерита, халькопирита, пентландита, а также никелевого магнетита	Сульфиды и никеленосный магнетит рассеяны в разных частях массива	3

43	Озеро Моак (Манитоба)	Граница провинций Черчилл и Суперьюр	Силл		Серпентинизированные дунит и перидотит	Рассеянный пирротин и пентландит	Закономерности в распределении сульфидов отсутствуют, иногда массивные сульфиды в трещинах	1,5
44A	Катиник (Квебек)	Граница провинций Черчилл и Суперьюр	Силл		Серпентинизированный перидотит	Рассеянный и массивный пентландит, пирротин и халькопирит	Сульфиды сконцентрированы у основания силла	1,5
44B	Рэгланд (Квебек)							
44C	Экспо (Квебек)							
45	Пайп-Лейк (Манитоба)	Граница провинций Черчилл и Суперьюр	Не известны		Серпентинизированный перидотит	Сульфиды	Не известно	менее 1,5
46A	Рэтти-Лейк (Квебек)	Граница провинций Черчилл и Суперьюр	Силлы	Силлы ультрабазитов, обычно в верхней части	Серпентинизированный перидотит, тремолитовый пироксенит, редко серпентинизированный дунит	Не известна	Не известна	1,5
46B	Озеро Томпсон (Квебек)							
46C	Озеро Асбестос (Квебек)							
46D	Озеро Гланс (Квебек)							
47	Озеро Рензи (Квебек)	Гренвилл	Силл		Серпентинизированный и тремолитовый перидотит, слоистый	Рассеянный пирротин, пентландит, халькопирит	Концентрирование в основании силла	1,5
48	Район Сотман (Онтарио)	Суперьюр	Силл	Некоторая дифференциация на габброиды и ультрабазиты	Серпентинизированный дунит и перидотит, тремолитовый перидотит, тремолитовый перидотит	Массивный и рассеянный пирротин, халькопирит	Концентрирование в нижней части силла	4



ФИГ. 1. Расположение участков отбора проб на карте.

Вследствие обычно плохой обнаженности ультраосновных массивов пришлось использовать все возможные типы проб. Таким образом, «общая проба» представляет собой смесь обычных образцов из обнажений, горных выработок и проб керна скважин. Во всех случаях около 200 г пробы дробилось и подвергалось обработке по методике, описанной в работе Камерона и Барагара (стр. 302).

В минерализованных интрузиях сама рудная зона при опробовании исключалась, так как целью работы было установить, насколько значительна минерализация, рассеянная в остальной части массива. Пробы представительны, насколько это возможно, для общей совокупности, характеризующей состав ультраосновной породы в массиве. В неоднородных телах обычно опробовались различные их части.

КЛАССИФИКАЦИЯ НИКЕЛЕВЫХ И МЕДНО-НИКЕЛЕВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПО ВЕЛИЧИНЕ

Предпринималась попытка определить количество сульфидов никеля и меди, ассоциирующих с каждым из опробованных участков ультрабазитов. К сожалению, конечные данные приближенные, поскольку разведка рудных тел проводилась многими компаниями с разной детальностью, поэтому различна степень отработки месторождений, а кроме того некоторые компании считают данные о запасах руд секретными и не публикуют их.

В табл. I перечислены участки минерализации, для которых известна связь с различными массивами. В табл. II участки, которые содержат разрабатываемые, потенциально-промышленные или значительные рудопроявления сульфидов никеля и меди, рассматриваются более детально. Участки, не включенные в табл. II, отнесены к *безрудным* (barren), даже если они содержат незначительные количества сульфидов.

В целях объективности к категории *рудноносных* (ore) отнесены все участки, из которых было добыто или которые имеют запасы более 5000 т никеля и меди. Остальные участки с запасами менее 5000 т никеля и меди классифицируются как *незначительные* (minore), минерализованные малым количеством рудного материала. Однако рассматриваемая группа содержит одно отработанное месторождение (рудник Алексо), так что и для месторождений этой группы возможна промышленная эксплуатация. Участок района Прейссак отнесен к незначительным, поскольку пробы отбирались в не-

скольких километрах от рудника Марбридж в пределах того же пояса ультраосновных пород.

ОБСУЖДЕНИЕ АНАЛИТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ

Медь, никель, кобальт. Так как целью этой работы являлось исследование распределения сульфидной фракции определенных металлов в ультраосновных породах, необходимо было использовать аналитический метод, специфичный для сульфидов. Это особенно важно для никеля и кобальта, поскольку они могут находиться в силикатах и окислах, входящих в состав образцов в количествах, превышающих в несколько раз их содержание в сульфидном компоненте. В методике, использованной для меди, никеля и кобальта, применяется холодное выщелачивание смесью аскорбиновой кислоты и перекиси водорода, приводящее к селективному растворению сульфидов. Этот метод широко применялся в СССР [7, 8, 25, 32].

Смирнова и др. [25] установили, что обычные сульфидные минералы ультраосновных пород растворяются в смеси аскорбиновой кислоты и перекиси водорода в течение нескольких часов. В этой работе мы подтвердили, что пирит, пирротин, пентландит, халькопирит, тетраэдрит, сфалерит, галенит и арсенопирит растворяются, если присутствуют в количествах, обычно встречающихся в пробах минерализованных пород.

Исследование другой стороны эффективности выщелачивания — количеств, в которых эти металлы остаются в силикатных и окисных минералах, — более сложно. Выщелачивание мономинерального концентрата силикатного или окисного минерала может дать вводящие в заблуждение результаты из-за возможных в нем сульфидных включений. При выщелачивании образцов оливина, клинопироксена и титаномагнетита смесью аскорбиновой кислоты и перекиси водорода Смирнова и др. [25] установили в растворе значительные количества никеля и кобальта. Из оливина при выщелачивании в раствор переходило, в среднем, 41,7% Ni и 51,8% Co, из клинопироксена — 34,8% Ni и 38,8% Co, а из титаномагнетита — 54,9% Ni и 60% Co. Смирнова и др. [25] относили эти растворимые количества элементов к сульфидным включениям в минералах. Для настоящей работы мы исследовали два образца оливина и по одному — клинопироксена и ортопироксена. Результаты (табл. III) удовлетворительны, так как показывают, что количество никеля и кобальта, выщелоченных из силикатов, очень мало; в каждом случае оно составляет менее

Таблица II

Размеры никелевых и медно-никелевых рудных месторождений, залегающих в опробованных ультраосновных породах или вблизи них. Пять верхних участков с запасами менее 5000 т Ni и Cu отнесены к *незначительным*, все другие — к *рудноносным*

Номера на карте	Месторождения или участки	Запасы руды, тыс. т	Содержание Ni в руде, %	Запасы Ni, тыс. т	Содержание Cu в руде, %	Запасы Cu, тыс. т	Запасы Ni и Cu, тыс. т	Источник	Примечание
15 24	Рудник Алексо Район Прейссак	56,8 ^p	(3,94)	2,2 ^p	(0,71)	0,4	2,6	1	Отработан В 9—12 км от Марбриджа, в том же теле гипербазитов
42	Падди-Лейк	?							Никеленосные магнетиты и сульфиды Ni, Cu и Co
46D	Озеро Глакс	?							Пирротин, пентландит и халькопирит в донной части силла
48	Район Сотмэн	210	1,29	2,7			2,7	2 ⁶⁹	
2	Истерн-Металс-Проспект	956 389	0,15 0,91	1,4 3,5	1,52	14,5	} 19,4	270	
4	Район Страти	732	0,38	2,8	0,65	4,8		7,6	270
10A	Рудный силл Лангмюр	166 478	1,92 0,77	3,2 3,7			} 6,9	270	
14	Рудник Тексмонт	3 516	1,06	37				37	3
26	Рудник Марбридж	775 ^p	(1,9)	14,5 ^p			14,5 ^p	4	Работы прекращены в июле 1968 г.
30	Озеро Вернер — озеро Гордон	593 ^{г68}	1,10	6,5 8,4 ^{г68}	0,52	3,1 4,5 ^{г68}	} 22,5	4	Отрабатывается
31	Бёрд-Ривер	1 350	1,06	14,3	0,34	4,6		189	270
38	Линн-Лейк	12 600	0,81	102 185 ^{г68}	0,43	54 81 ^{г68}	} 422	270	Отрабатывается
39A	Северный силл Шебандован	?							
41C	Рудный силл Буско	40 000	0,8	320			326	270	
43	Озеро Моак	?							Запасы, вероятно, более 5000 т Ni + Cu
44A	Катиник	3 392	3,06	104	0,80	27	131	5	
44B	Рэглан	2 621	4,43	116	0,99	26	142	5	
44C	Экспо	4 000	0,96	38	1,04	42	80	5	
45	Пайп-Лейк	?							Запасы, вероятно, более 5000 т Ni + Cu
47	Озеро Рензи	1 012	0,72	7,3	0,70	7,1	14,4	5	Отрабатывается

Источники: 1 — Шанкла [23]; 2 — Справочник канадской горнодобывающей промышленности за 1968—1969 гг. (2⁶⁹) и за 1969—1970 гг. (270); 3 — «Северный горняк», 1 января 1970 г.; 4 — «Финансовая служба горнодобывающей промышленности», 1970 г.; 5 — Лорин и Дугас [13].

Сокращения: p — общая добыча; г⁶⁸ — добыча на конец 1968 г.; г⁶⁸ — запасы на конец 1968 г.

Таблица III

Выщелачивание Cu, Ni и Co из силикатных минералов смесью аскорбиновой кислоты и перекиси водорода

Минералы	Полное разложение (HF)			Выщелачивание смесью аскорбиновой кислоты и H ₂ O ₂		
	Cu, млн ⁻¹	Ni, млн ⁻¹	Co, млн ⁻¹	Cu, млн ⁻¹	Ni, млн ⁻¹	Co, млн ⁻¹
Оливин, остров Дьюк, Аляска	3	695	173	2	26	7
Оливин, озеро Эйкен, Британская Колумбия	9	2000	125	5	66	5
Клинопироксен, Маскок, Северо-Западные территории	7	246	38	3	12	1
Ортопироксен, Маскок, Северо-Западные территории	33	493	83	30	12	0

5% общего их содержания в минералах. Во всех образцах, кроме ортопироксена, общее содержание меди очень низкое. Ортопироксен содержит 33 млн⁻¹ Cu, что обусловлено наличием сульфидной меди (Ирвин, личное сообщение). Это количество почти полностью было выщелочено из порошка пробы.

Для ультраосновных пород, которые серпентинизированы или изменены другими процессами, положение менее ясное. Связаны ли металлы также прочно в продуктах изменения силикатов относительно воздействия смеси аскорбиновой кислоты и перекиси водорода? Изменения, которые сопровождают серпентинизацию, включают превращение металлов в сульфидной форме и металлов, находящихся в первичных силикатах, в интерметаллические соединения [9], такие, как аваруйт Ni₃Fe. Исследованный Линчем образец джозефенита, состоящий из смеси аваруйта и самородной меди, разложился при воздействии смеси аскорбиновой кислоты и перекиси водорода в течение нескольких часов. Однако имеет ли это место при наличии других соединений и смесей?

Чувствительность используемого аналитического метода составляет для меди 1 млн⁻¹, для кобальта — 2 млн⁻¹ и для никеля 3 млн⁻¹. Медь и кобальт в некоторых образцах не были обнаружены. В целях математической обработки для этих образцов приняты содержания 1 млн⁻¹ Cu или 2 млн⁻¹ Co. Производительность аналитического метода для меди, никеля и кобальта на одного человека при использовании автоматического приспособления для обработки проб, автоматической записи результатов анализа и математической обработки их на ЭВМ составляла 100 образцов за один рабочий день.

Сера определялась методом быстрого окисления, описанным Сен-Гуптой [22]. Чувствительность метода 100 млн⁻¹. Очень большое число образцов содержало серу в меньшем количе-

стве, и для целей математической обработки этим образцам также было дано содержание серы 100 млн⁻¹. Производительность метода составляет 18 образцов за один рабочий день.

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ДАННЫХ

В табл. IV приведены статистические данные для 1079 образцов, сгруппированных по 61 участку в три группы. По каждому участку и каждой группе даны среднее значение, стандартное отклонение и среднее геометрическое для меди, никеля, кобальта и серы. Приведены также коэффициенты корреляции этих элементов. Коэффициенты корреляции определены по логарифмам концентраций. Данные для дискриминантных равенств, по которым наиболее достоверно отличаются безрудные и рудоносные ультрабазиты, были подсчитаны по логарифмам содержаний меди, никеля и кобальта. Детальнее это будет обсуждаться ниже.

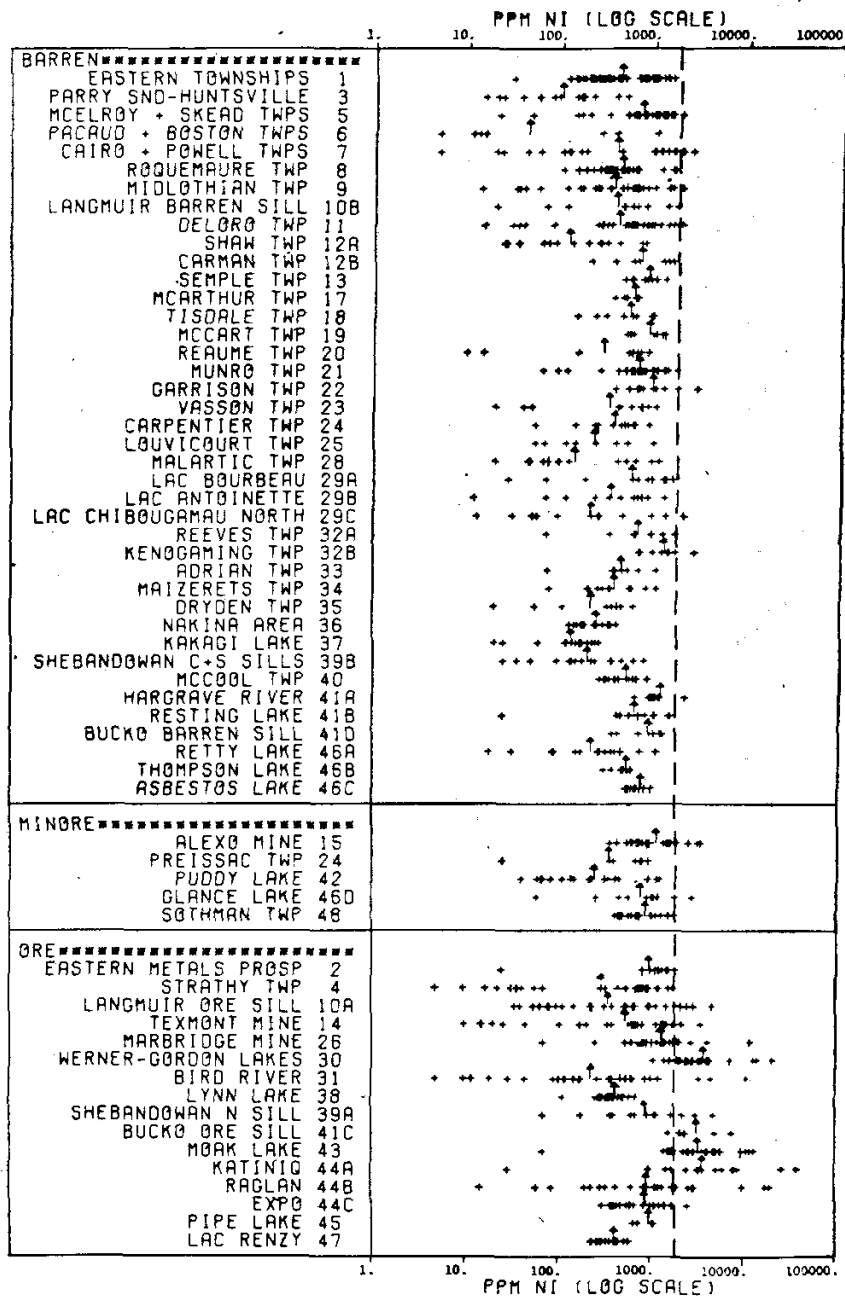
Данные по содержаниям элементов на каждом участке представлены на фиг. 2—5. Графики имеют логарифмическую шкалу с постоянными для всех фигур интервалами, соответствующими увеличению в 10 раз. Это позволяет визуально сравнить относительную дисперсию содержаний различных элементов. Средние геометрические для содержаний элементов на каждом участке отмечены стрелкой, направленной вверх. Если два (или более) образца из одного участка имели одинаковое содержание данного элемента, то количество знаков +, отмечающих второй и следующие образцы с этим содержанием элемента, последовательно возрастало к правой части фигуры. Таким образом, количество образцов с тем же содержанием элемента (например, 0,01% — порог чувствительности для серы) выражается в виде ленты, протягивающейся вправо от данного значения. На фиг. 6 для каждого изученного участка пред-

Распределение Cu, Ni, Co и S в ультраосновных породах различных групп и участков

Номер на карте	Количество образцов	Cu, млн-1			Ni, млн-1			Co, млн-1			S, %			Дискриминантный отсчет		Коэффициенты корреляции логарифмов концентраций элементов					
		\bar{x}	S	G	\bar{x}	S	G	\bar{x}	S	G	\bar{x}	S	G	\bar{x}	S	Cu/Ni	Cu/Co	Cu/S	Ni/Co	Ni/S	Co/S
1	55	3,7	3,8	2,5	527	395	389	30,9	29,8	22,8	0,028	0,032	0,018	2,6	0,68	0,17	0,38	0,28	0,53	0,59	0,52
3	15	62,3	64,7	39,3	140	139	87,9	99,1	49,7	82,1	0,327	0,359	0,142	4,2	0,91	0,40	0,62	0,84	0,75	0,01	0,37
5	34	10,1	15,2	3,8	861	469	647	57,4	32,0	44,2	0,039	0,040	0,025	3,1	0,99	-0,14	-0,09	0,37	0,87	0,42	0,44
6	9	104	79,6	87,1	198	349	38,7	43,8	57,3	15,6	0,098	0,062	0,079	4,4	0,74	-0,12	-0,18	0,01	0,88	-0,58	-0,20
7	24	23,7	29,1	8,3	876	796	355	54,3	35,2	39,3	0,077	0,156	0,029	3,5	1,0	-0,46	-0,40	-0,10	0,93	0,09	0,17
8	35	6,3	9,1	2,8	479	345	402	36,3	43,8	17,9	0,021	0,016	0,017	2,7	0,94	0,12	0,67	0,29	-0,02	0,24	0,16
9	31	18,1	34,8	6,1	561	490	333	32,9	22,3	27,0	0,042	0,084	0,020	3,2	0,87	-0,52	-0,30	0,25	0,83	0,21	0,45
10B	10	3,4	4,4	1,9	638	571	350	44,3	26,2	39,3	0,049	0,053	0,028	2,4	0,93	0,22	0,10	-0,31	0,77	0,69	0,67
11	31	31,2	64,4	7,4	646	519	371	45,8	25,9	38,8	0,043	0,032	0,031	3,4	1,1	-0,42	-0,07	-0,26	0,83	0,57	0,33
12A	18	6,9	8,3	3,5	211	242	111	20,6	16,3	16,4	0,011	0,003	0,011	2,5	0,89	-0,11	-0,50	-0,08	0,73	0,11	0,21
12B	8	16,7	40,2	2,8	827	538	668	24,2	16,7	18,6	0,032	0,020	0,027	2,9	1,2	-0,20	0,61	0,27	0,15	0,75	0,55
13	11	22,7	25,1	12,4	816	259	780	22,6	23,4	16,6	0,138	0,372	0,020	3,9	0,94	0,55	0,44	0,41	0,64	0,68	0,95
17	8	12,4	6,7	10,5	554	106	545	45,5	10,2	44,4	0,019	0,017	0,017	3,8	0,48	0,27	0,08	0,12	0,70	0,59	0,44
18	9	7,1	12,4	3,3	585	324	491	35,3	12,1	33,4	0,011	0,003	0,011	2,9	0,88	0,22	-0,05	0,13	0,93	0,10	-0,04
19	8	13,9	10,7	9,0	863	335	807	70,7	27,9	64,2	0,031	0,027	0,022	3,8	0,87	0,26	0,77	0,38	0,73	0,93	0,76
20	10	62,8	138,0	15,8	504	331	263	54,6	32,0	42,9	0,035	0,036	0,026	3,8	0,89	-0,62	-0,67	0,05	0,65	-0,36	0,12
21	28	15,7	20,0	5,6	776	413	625	58,2	30,2	49,0	0,041	0,033	0,030	3,4	1,1	-0,07	0,23	0,28	0,60	0,11	0,03
22	12	32,2	65,1	4,4	1030	705	880	36,6	43,9	21,7	0,034	0,029	0,025	3,3	1,6	0,68	0,80	0,55	0,87	0,70	0,69
23	11	35,6	40,4	22,9	523	362	300	35,3	20,7	26,8	0,054	0,039	0,042	4,1	0,85	0,06	0,09	0,00	0,99	0,86	0,89
25	11	10,8	7,3	6,7	437	252	350	64,2	36,1	52,5	0,021	0,018	0,016	3,3	0,94	0,06	0,39	0,36	0,53	0,58	0,47
27	8	18,0	17,9	12,0	329	331	211	29,4	26,3	20,8	0,021	0,017	0,017	3,5	0,85	0,38	0,37	-0,10	0,27	0,80	-0,17
28	16	58,1	23,5	54,6	278	362	128	38,8	26,3	30,5	0,159	0,119	0,126	4,4	0,38	-0,49	-0,24	0,23	0,83	0,06	0,34
29A	12	66,3	109	17,1	842	537	534	81,3	47,1	55,0	0,122	0,076	0,095	4,1	1,3	-0,26	-0,39	0,27	0,92	0,52	0,42
29B	12	32,0	52,6	12,1	520	387	317	34,3	35,7	21,5	0,053	0,047	0,037	3,7	0,90	-0,40	0,18	-0,15	0,62	0,84	0,90
29C	16	126	285	10,1	534	734	195	47,2	44,9	29,1	0,065	0,049	0,050	3,4	1,7	-0,13	0,33	0,42	0,60	0,50	0,64
32A	9	18,9	27,9	6,3	823	503	631	42,8	16,5	39,8	0,050	0,033	0,039	3,4	1,0	-0,51	-0,03	0,26	0,49	0,40	0,14
32B	9	117	305	16,9	1330	662	1200	66,4	12,3	65,6	0,160	0,159	0,123	4,4	1,4	0,65	0,77	0,89	0,78	0,83	0,89
33	8	89	9,6	5,1	509	303	415	42,4	25,2	35,9	0,046	0,020	0,042	3,2	0,81	-0,33	0,47	-0,41	0,37	0,76	0,12
34	11	6,5	6,5	3,7	442	315	348	24,5	21,1	20,1	0,030	0,013	0,027	2,9	0,91	0,24	0,06	0,81	0,75	0,39	0,19
35	8	26,0	34,0	14,5	304	222	193	27,9	18,6	21,2	0,031	0,009	0,030	3,6	0,85	-0,10	-0,33	0,45	0,96	0,52	0,44
36	16	4,0	3,1	2,9	242	90,5	227	35,5	13,4	32,1	0,046	0,011	0,045	2,6	0,68	0,39	0,44	0,33	0,63	0,66	0,46
37	16	20,2	17,8	14,1	147	70,7	121	28,6	15,8	20,8	0,030	0,013	0,028	3,5	0,77	0,12	0,20	0,52	0,91	0,44	0,48
39B	16	14,8	15,7	9,9	267	227	179	43,1	25,5	31,3	0,048	0,052	0,035	3,4	0,76	0,07	0,00	0,43	0,80	0,74	0,61
40	16	15,3	35,0	3,8	503	200	469	25,1	20,0	17,3	0,046	0,021	0,041	3,0	1,2	0,64	0,33	0,00	0,24	0,39	0,29
41A	12	22,3	16,0	13,2	1149	377	1106	61,5	19,9	58,1	0,130	0,072	0,114	4,2	0,87	-0,45	0,33	-0,14	0,23	0,49	0,32
41B	12	75,0	117	18,9	791	458	586	54,9	32,1	39,8	0,107	0,107	0,055	4,2	1,7	0,70	0,78	0,82	0,93	0,58	0,61
41D	7	6,7	6,2	4,7	928	411	832	50,0	15,4	48,1	0,107	0,069	0,082	3,3	0,77	0,75	0,30	0,76	0,41	0,94	0,35
46A	14	22,4	44,6	7,5	322	302	199	41,6	26,3	34,2	0,032	0,033	0,023	3,2	1,2	0,42	0,29	0,52	0,90	0,71	0,68
46B	10	9,7	13,9	5,3	494	96,1	484	44,8	19,9	40,0	0,052	0,064	0,036	3,2	0,72	-0,35	0,21	0,77	-0,16	-0,65	0,32
46C	10	13,2	17,4	7,1	696	134	685	60,7	22,9	55,6	0,058	0,025	0,054	3,6	0,79	0,13	0,39	0,24	0,53	0,63	0,33

Все безрудные ультрабазиты	616	25,9	74,5	6,9	579	483	354	43,9	33,3	31,3	0,059	0,107	0,031	3,33	1,09	-0,19	0,18	0,38	0,56	0,20	0,40
15	31	15,2	16,6	6,2	1208	786	1014	55,9	36,0	45,7	0,149	0,394	0,034	3,6	1,0	-0,30	0,19	0,09	0,69	0,52	0,71
24	9	49,8	33,2	38,0	546	358	317	38,4	23,4	25,9	0,106	0,099	0,061	4,5	0,66	-0,30	0,35	-0,04	0,97	0,74	0,68
42	23	33,1	97,7	3,7	351	361	218	23,5	30,1	9,3	0,053	0,079	0,025	2,7	1,6	0,48	0,59	0,65	0,81	0,82	0,77
46D	10	295	416	38,4	1024	806	698	87,4	90,9	57,8	0,879	1,39	0,184	4,8	1,9	-0,13	0,42	0,79	0,78	0,43	0,81
48	18	6,3	11,9	2,7	884	448	789	25,6	22,4	20,4	0,029	0,036	0,019	2,9	0,88	0,27	0,67	0,36	0,66	0,81	0,80
Все ультрабазиты с незначительным оруденением	91	52,2	166	6,8	842	687	560	43,5	45,4	25,2	0,177	0,559	0,036	3,44	1,41	0,05	0,43	0,52	0,81	0,44	0,64
2	12	2,5	1,7	2,2	1125	454	863	68,7	23,6	56,5	0,143	0,096	0,114	2,8	0,53	0,21	0,19	0,15	0,99	0,92	0,89
4	35	251	307	125	587	481	268	66,7	42,6	47,4	0,114	0,160	0,055	5,3	1,5	0,71	0,64	0,68	0,92	0,67	0,64
10A	36	40,0	69,5	16,3	742	1 010	319	51,6	32,3	41,3	0,210	0,290	0,087	3,9	1,1	0,11	-0,02	0,24	0,76	0,54	0,61
14	36	43,5	89,4	12,7	988	823	470	49,6	26,1	41,3	0,128	0,187	0,067	3,9	1,0	-0,49	-0,32	0,32	0,88	0,00	0,28
26	36	57,5	166	15,4	1570	1 900	1130	77,6	51,4	65,7	0,220	0,261	0,146	4,3	1,2	0,16	0,03	0,34	0,74	0,62	0,53
30	29	2500	2590	1710	4380	4 350	3340	168	123	141	1,92	2,27	1,09	7,9	0,79	0,83	0,81	0,37	0,96	0,24	0,25
31	32	263	477	62,5	882	2 090	205	57,6	95,4	24,4	0,389	1,15	0,076	4,7	1,6	0,38	0,33	0,81	0,94	0,61	0,56
38	25	94,7	110	56,2	396	123	376	39,4	16,4	36,8	0,112	0,061	0,094	4,8	0,83	0,54	0,49	0,74	0,06	0,77	0,34
39A	13	380	581	109	1350	1 360	807	82,1	54,8	54,7	0,466	0,525	0,219	5,5	1,7	0,61	0,61	0,87	0,89	0,71	0,56
41C	7	31,0	58,1	11,8	3330	2 200	2870	95,7	63,5	80,9	0,314	0,197	0,272	4,4	1,0	0,67	0,53	0,75	0,84	0,96	0,81
43	27	221	220	134	4180	3 490	2930	147	89,7	124	1,82	2,24	0,980	6,1	1,0	0,65	0,65	0,87	0,97	0,78	0,78
44A	16	1180	1470	475	7570	10 600	3270	181	185	125	1,92	3,39	0,710	7,0	1,5	0,75	0,80	0,91	0,91	0,73	0,85
44B	28	651	1180	187	2690	4 980	846	89,5	96,0	58,9	0,561	1,02	0,172	5,9	1,6	0,69	0,59	0,80	0,95	0,73	0,69
44C	20	669	1010	101	960	594	806	76,6	34,7	68,8	0,541	0,628	0,196	5,5	1,8	0,85	0,90	0,97	0,87	0,90	0,90
45	4	122	161	45,7	895	224	874	75,2	46,5	66,8	0,115	0,044	0,109	5,0	1,3	0,25	0,03	0,81	0,80	-0,15	-0,54
47	16	247	76,8	235	386	118	369	56,3	22,9	52,5	0,298	0,105	0,284	5,8	0,31	0,54	0,39	0,65	0,94	0,63	0,53
Все рудопосные ультрабазиты	372	439	1111	67,8	1875	3 577	715	83,7	84,5	57,4	0,582	1,37	0,166	5,15	1,73	0,36	0,42	0,63	0,89	0,67	0,67
Все ультрабазиты	1079	171	684	15,2	1048	2 223	469	57,6	60,2	37,9	0,249	0,857	0,056	3,96	1,62	0,19	0,40	0,65	0,71	0,49	0,59

Примечания: \bar{x} — среднее содержание, S — стандартное отклонение, G — геометрическое среднее. Cu, Ni и Co выщелачивались из пород смесью аскорбиновой кислоты и H_2O_2 .



ФИГ. 2. Распределение меди, выщелачиваемой из пород смесью аскорбиновой кислоты и перекиси водорода.

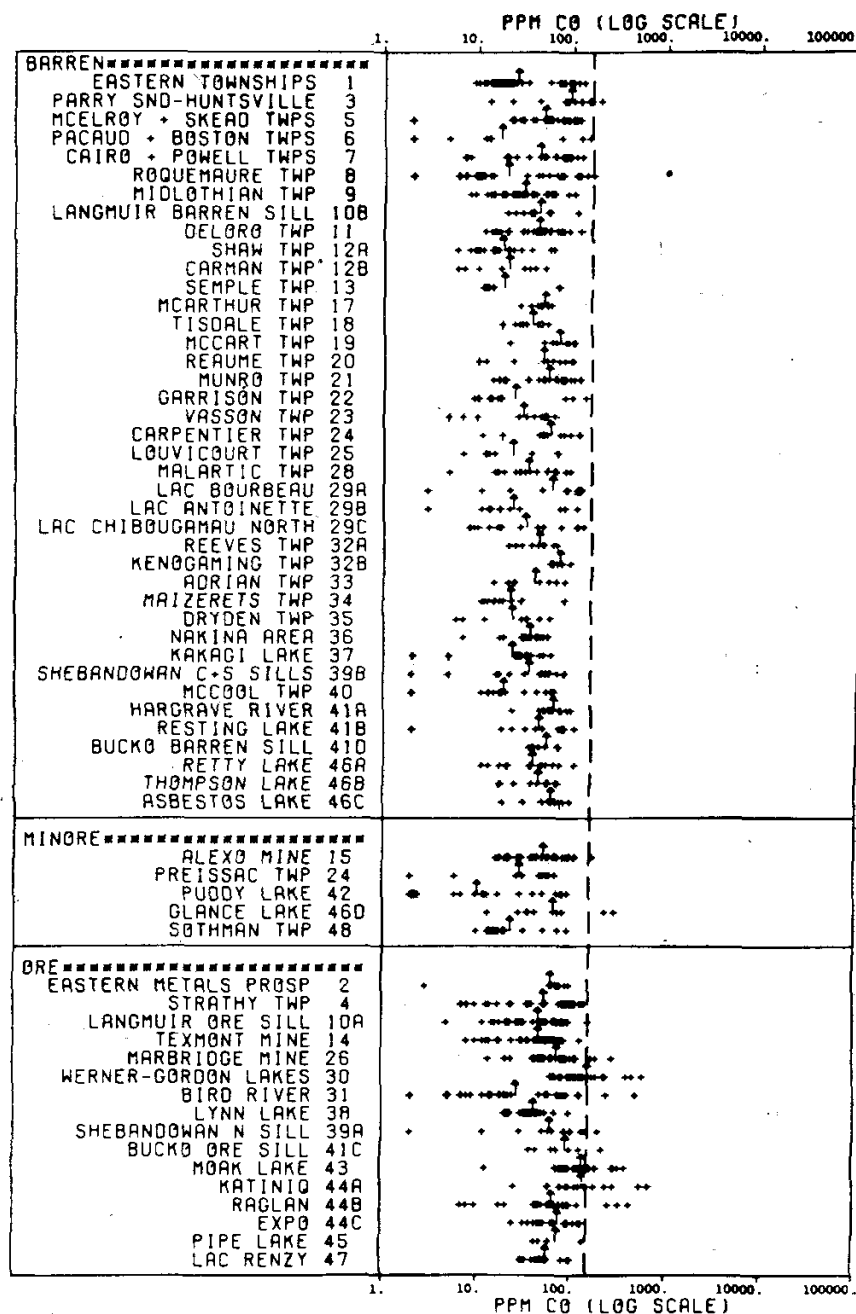
Номера участков на фиг. 2, 3, 4, 5, 6, 8 соответствуют их номерам на фиг. 1 и в табл. I.

ставлены следующие отношения: $(\overline{Cu} + \overline{Ni} + \overline{Co}) / \overline{S}$, $\overline{Cu} / \overline{Ni}$, $\overline{Co} / \overline{Ni}$, где \overline{Cu} , \overline{Ni} , \overline{Co} и \overline{S} являются среднеарифметическими значениями содержаний этих элементов в каждом участке.

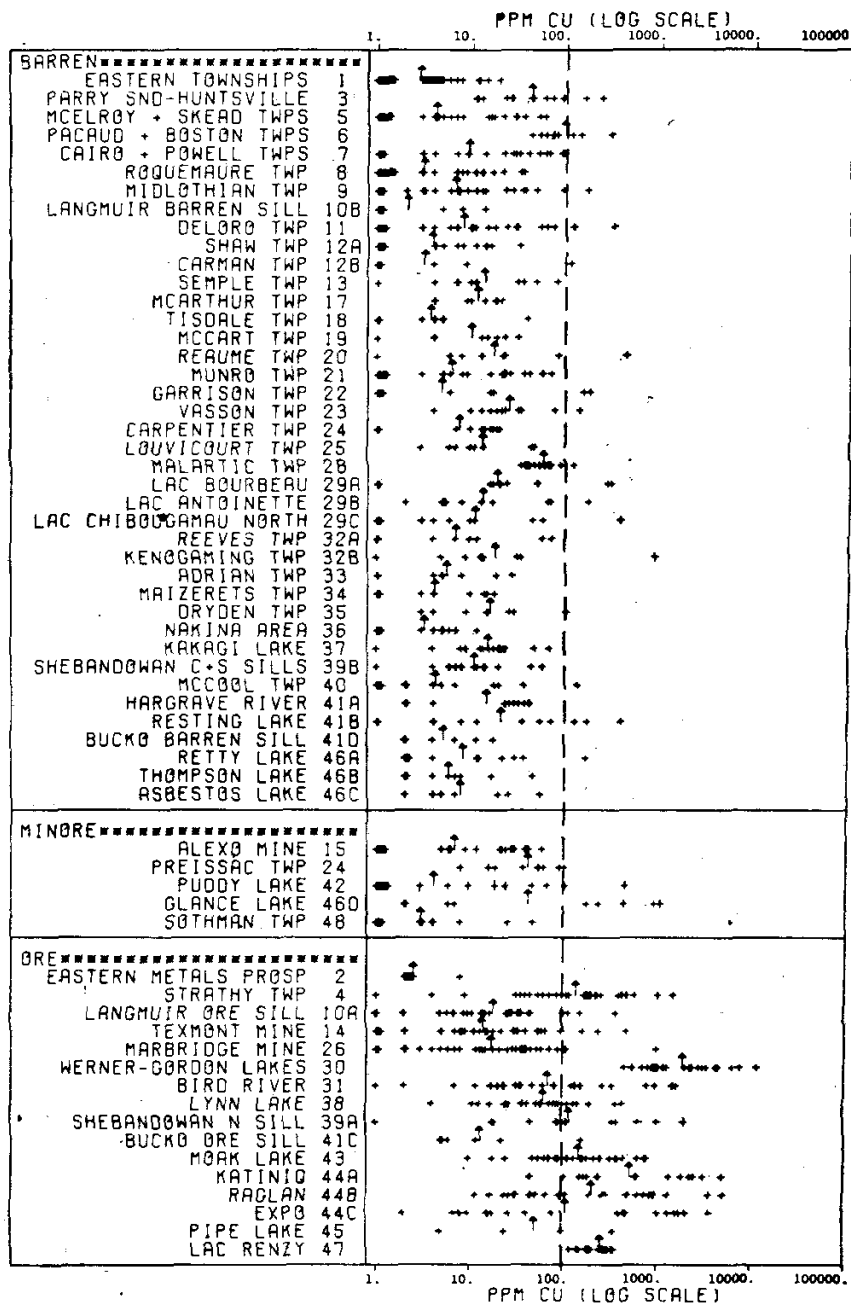
Из данных, приведенных в табл. IV и представленных на фиг. 2—5, видно, что наблюдается явное обогащение медью, никелем, серой и в меньшей степени кобальтом ультраосновных пород, с которыми ассоциируют рудные месторождения, относительно безрудных ультраосновных пород. На каждой из фиг. 2—5 проведена линия, по-видимому, наиболее точно определяющая распределение сульфидного компонента в пустых ультрабазитах от его распределения в рудоносных ультраосновных породах. Всего в нескольких пробах из безрудных ультра-

трабазитов концентрации выше значений, представленных этой линией. Значительная часть проб из рудоносных ультрабазитов, наоборот, содержит более высокое количество одного или нескольких из этих элементов. Для меди линия проведена через $lg = 2$ (100 млн⁻¹ Cu), для никеля — через $lg = 3,25$ (1780 млн⁻¹ Ni), для кобальта — через $lg = 2,20$ (158 млн⁻¹ Co), для серы — через $lg = -1,25$ (0,178% S).

С этой точки зрения необходимо обсудить физико-химические механизмы, которые определили увеличение указанных выше содержания элементов. В основной или ультраосновной магме несмешиваемая сульфидная жидкость и сульфидные кристаллы будут обособляться, если превышаете произведение растворимости одного или нескольких различных металло-сульфидных соединений. Пока этого не происходит, все



ФИГ. 3. Распределение никеля, выщелачиваемого из пород смесью аскорбиновой кислоты и перекиси водорода.

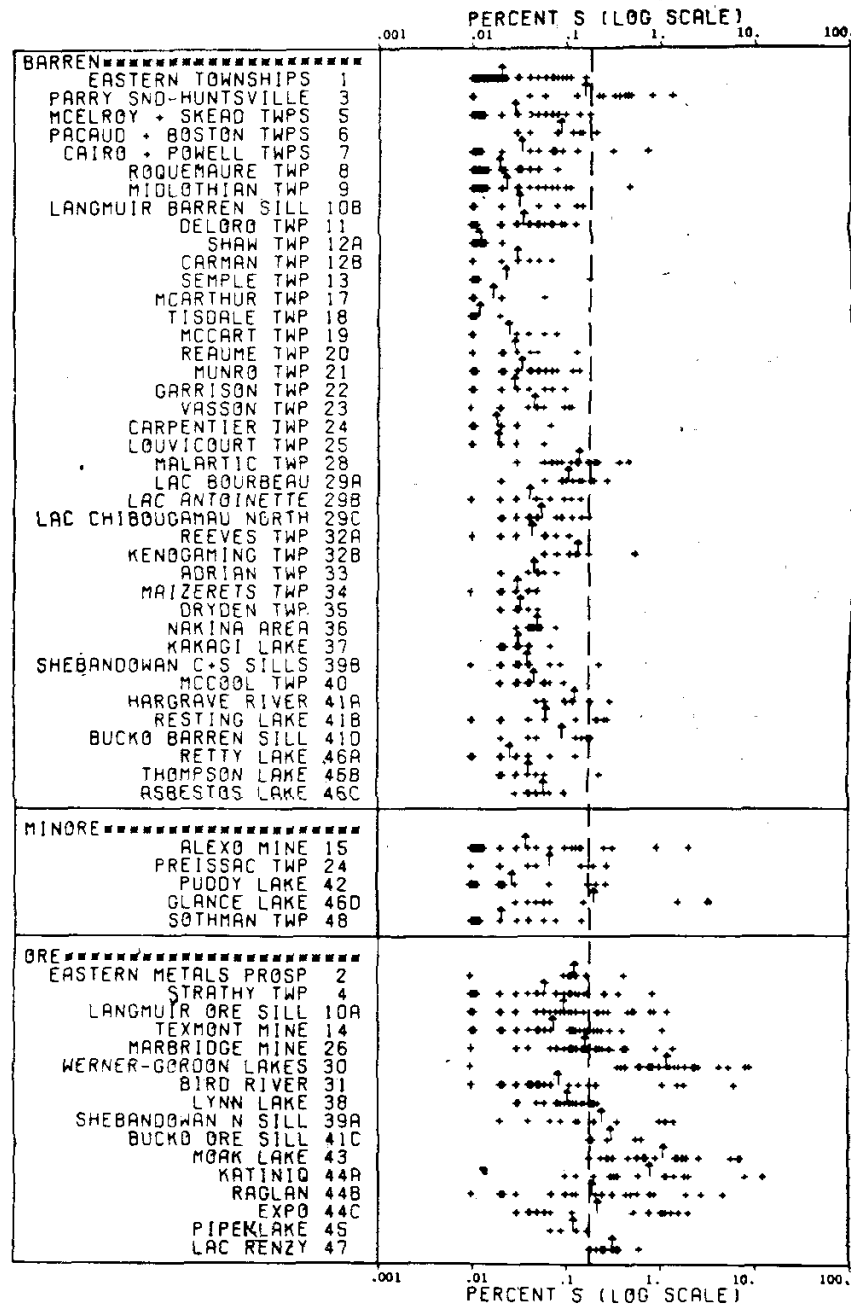


ФИГ. 4. Распределение кобальта, выщелачиваемого из пород смесью аскорбиновой кислоты и перекиси водорода.

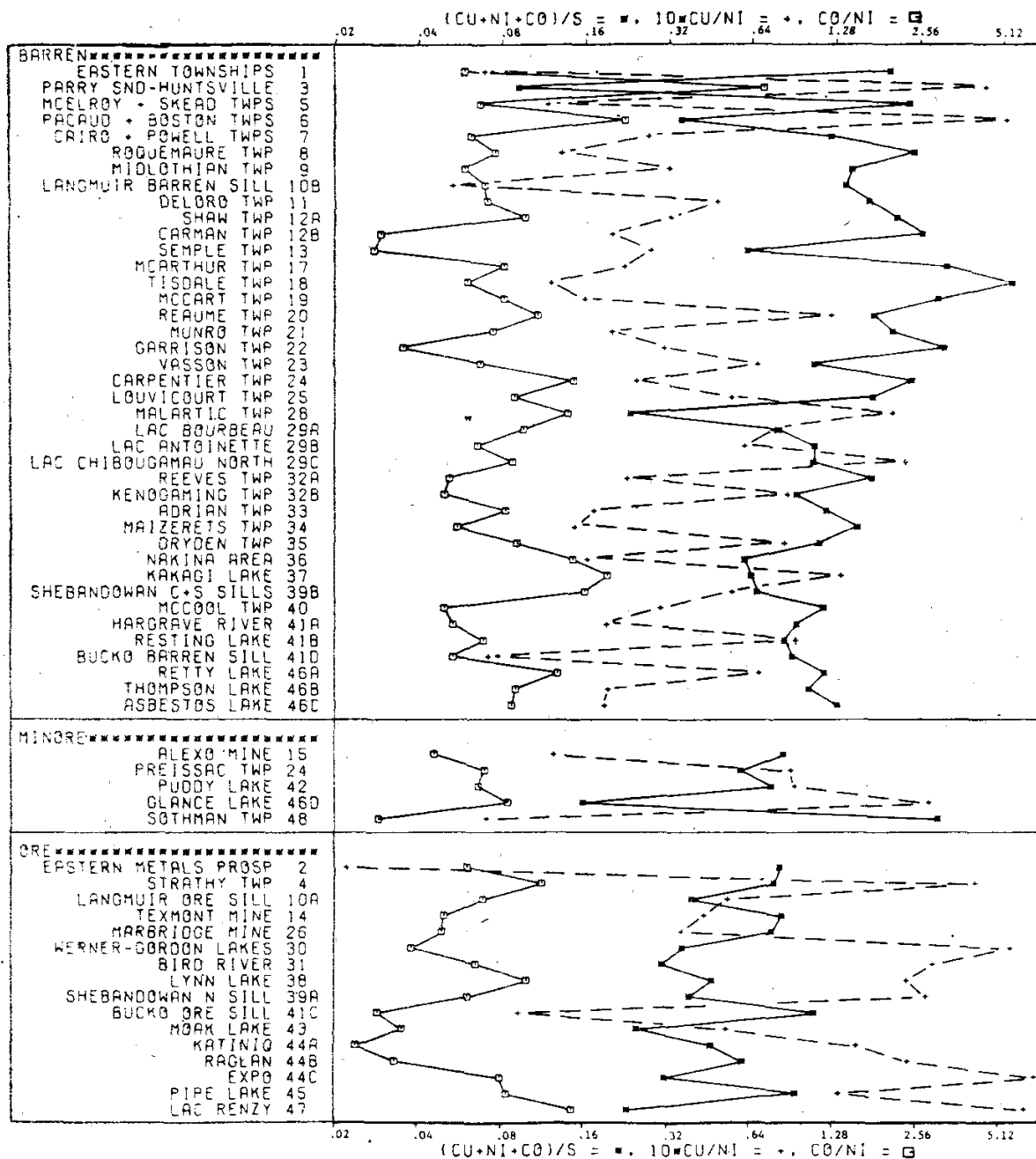
металлы и сера удерживаются в силикатной жидкости в растворенном состоянии. Точка, при которой сульфид отделяется от силикатной жидкости, зависит от относительного количества металлов, способных входить в сульфидную фракцию, от содержания других компонентов в силикатном расплаве и от температуры и давления. Однако главным фактором, контролирующим отделение сульфида, является содержание серы в магме. Для образования магматических сегрегационных медно-никелевых рудных месторождений несмесиная сульфидная жидкость или кристаллические сульфиды должны отделяться на ранней стадии кристаллизации силикатной жидкости, так чтобы они не были захвачены между кристаллами силикатов. Это предполагает высокое содержание серы в силикатной жидкости, будь то первоначальная маг-

ма или ее дифференциат. После первоначального отделения сульфидов силикатная жидкость будет еще содержать серу, которая в процессе кристаллизации продолжает отделяться от силикатной жидкости в виде сульфидной жидкости или кристаллов. Поздние сульфиды будут стремиться к рассеянию в ультраосновной породе, так как они осаждаются с кристаллами силикатов и, следовательно, захватываются между ними и рассеиваются.

В настоящее время существует ограниченное количество данных о растворимости сульфидов в основных магмах. Уэйджер и др. [29] при изучении интрузии Скаергаард считали, что богатые медью сульфиды выделялись в различное время, когда содержание серы в магме изменялось примерно от 100 млн⁻¹ до 300 млн⁻¹. Более поздний сульфид железа выделялся при содержании серы в силикатной жидкости, равном приблизительно 600 млн⁻¹.



ФИГ. 5. Распределение серы в породах.



ФИГ. 6. Отношения элементов в породах различных участков. Квадратами отмечено отношение Co/Ni , звездочками — $(Cu + Ni + Co)/S$, крестами — $10Cu/Ni$.

Скиннер и Пэк [24] установили, что жидкость и кристаллические сульфиды обособлялись от базальтовой магмы при температуре $1065^{\circ}C$, когда содержание серы в магме достигало 380 млн^{-1} .

При изучении данных по сере, представленных в табл. IV и на фиг. 5, можно заметить, что в классе безрудных ультраосновных пород среднее содержание серы колеблется наиболее часто в пределах $0,01-0,1\%$. Среднее содержание серы в 616 образцах из этой группы составляет $0,059\%$, а среднее геометрическое — $0,031\%$. При увязывании этих данных с приведенными выше значениями растворимости сульфидов в основных магмах выясняется, что большинство тел, отнесенных к безрудным, содержали слишком мало серы, чтобы произошло раннее отделение и обособление сульфидных

кристаллов или жидкости. Для большинства тел или участков, отнесенных к рудоносным, характерно накопление серы. Здесь пределы колебания средних значений для содержания серы составляют $0,11-1,92\%$, а среднее содержание для 372 образцов равно $0,582\%$, т. е. почти на порядок выше, чем для группы безрудных пород.

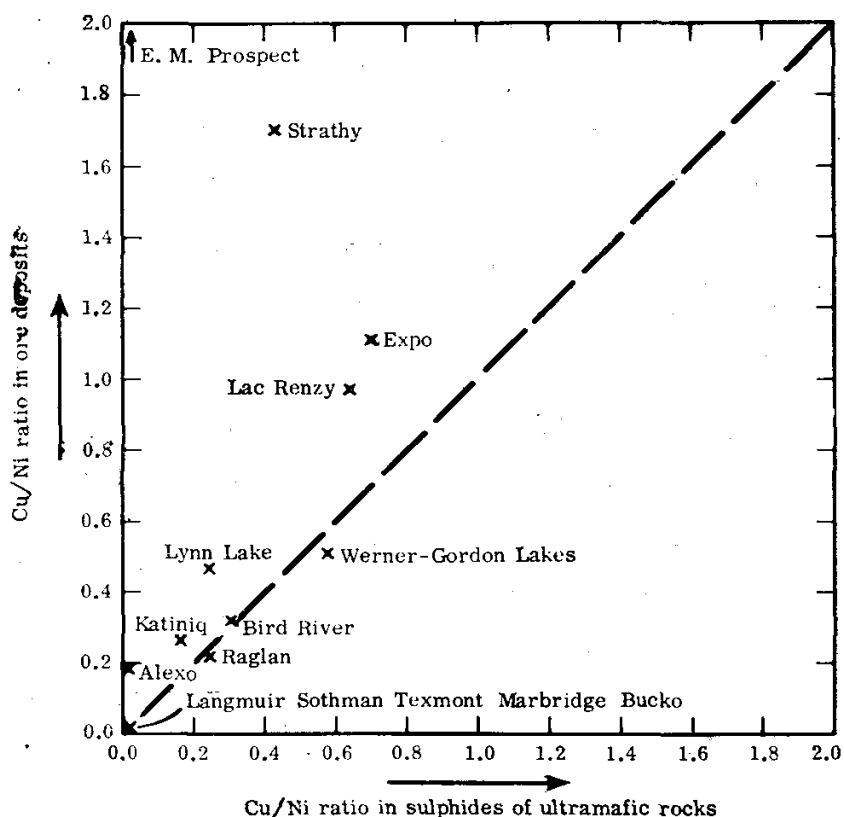
Здесь уместно задать вопрос, насколько представительны для ультраосновных пород эти средние значения по содержаниям серы, особенно для группы рудоносных пород. К счастью, некоторые наиболее богатые сульфидами тела входят в число наиболее представительных опробованных. Для пояса Вернер — озеро Гордон среднее содержание серы, рассчитанное по 29 образцам, отобраным по 10-километровой длине пояса, равно $1,92\%$, а среднее геометрическое — $1,09\%$. Содержание для трех участков рудоносных пород в Унгава (Катиник, Рэглан и Экспо) определены по образцам из обнажений и керна скважин,

представительным для этих силлов ультраосновных пород — от их висячего контакта до лежачего, исключая, конечно, рудные зоны в лежащей части. В случае участка Катиник, основываясь на 16 образцах из керна скважин, мы можем сравнить наши результаты (для серы среднее арифметическое $1,92\%$ и среднее геометрическое $0,71\%$) со средним содержанием серы $1,21\%$ и средним геометрическим значением $1,01\%$ для 37 образцов серпентинитов, приведенных в работе Уилсона и др. [31]. Последние взяты из полного керна разреза через силл, но его положение относительно керна, который мы опробовали, не известно. При обобщении этих данных массивная сульфидная зона в лежащей части силла также была исключена. Средние значения, полученные из данных Уилсона и др., вероятно,

должны быть более точными, чем сообщаемые в настоящей работе, поскольку эти исследователи анализировали керн по всей мощности тела в виде объединенных проб из каждых 3,5 м. Поэтому не удивительно значительно более низкая дисперсия их данных, выражающаяся в меньшем различии между геометрическим и арифметическим средними значениями, сравнительно с нашими анализами проб весом 200 г, взятых в интервалах примерно через 7 м по вертикали. Если принять во внимание, что различные части шлота были опробованы совершенно разными методами, соответствие двух серий данных по участку Катиник очень хорошее.

Таким образом, мы можем сказать, что тела ультраосновных пород, с которыми ассоциируют медно-никелевые месторождения, часто в довольно значительной степени обогащены серой. Это обогащение серой материнской ультраосновной магмы будет вызывать раннее отделение и концентрирование сульфидов. Может иметь значение и тот факт, что мелкие никелевые месторождения района Поркьюпайн (Алексо, Тексмонт, Лагмюр), где Налдрет [15] предполагает образование сульфидов никеля путем сульфуризации, вместе с другими месторождениями этого большого региона (район Сотмэн, Марбридж) имеют более низкие содержания серы, чем средние значения для группы *рудоносных* пород. Из этих пяти участков было отобрано 157 проб, содержание серы в которых составляло 0,161%, а среднее геометрическое — 0,064%.

Обогащение серой в пробах группы *рудоносных* пород, конечно, параллелизуется с обогащением одним или несколькими элементами — медью, никелем и кобальтом — тех же самых проб. Для большинства участков рудоносных пород обогащение никелем и кобальтом не очень высоко относительно общего содержания их в типичных ультраосновных породах (2000 млн⁻¹ Ni, 150 млн⁻¹ Co, 10 млн⁻¹ Cu [27]). Для меди подобное обогащение часто весьма значительно. Была ли эта медь привнесена с серой из внешнего источника или ее накопление произошло путем концентрирования из других частей первичной магмы? Если она не привносилась вместе с серой извне, то что происходит при кристаллизации лишенных серы, но обогащенных медью ультраосновных магм? Могут ли образовываться в результате значительные объемы богатых медью остаточных растворов, которые затем могут мигрировать, отлагая медные руды, не связанные явно с ультраосновными породами? Для всей серии образцов коэффициент корреляции между медью и серой равен 0,65



ФИГ. 7. Сравнение отношений Cu/Ni в рудных месторождениях и в сульфидах ассоциирующих с ними ультраосновных пород.

(табл. IV); он выше, чем коэффициенты корреляции никеля и кобальта с серой (соответственно 0,49 и 0,59).

Хотя медь и никель часто ассоциируются в рудных месторождениях, связанных с ультраосновными породами, их химические свойства довольно сильно различаются. Поэтому очень низкий коэффициент корреляции в породах между медью и никелем, равный 0,19, не является неожиданным. Коэффициенты корреляции кобальта с медью (0,40) и кобальта с никелем (0,71) показывают, что кобальт по характеру промежуточный между этими двумя элементами, но более близок к никелю. Для группы рудоносных пород коэффициент корреляции меди и никеля возрастает до 0,89.

Как можно было ожидать, учитывая низкий коэффициент корреляции, отношение меди к никелю широко варьирует от участка к участку. Там, где имеется достаточно данных, обычно наблюдается хорошее соответствие между медно-никелевым отношением в рудных месторождениях и в сульфидах, содержащихся в ассоциирующих с этими месторождениями ультраосновных породах (табл. V, фиг. 7). Только для разведочного участка Истерн-Металс и для месторождения Страти наблюдаются большие различия между этими парами отношений элементов. Для этих двух месторождений указанные различия могут быть достаточными, чтобы поставить под вопрос существование генетической связи между сульфидами руд и сульфида-

Таблица V

Отношение Cu/Ni в рудных месторождениях и сульфидах ассоциирующих с ними ультраосновных пород

Номера на карте	Участки	Запасы или добытое количество, тыс. т			Среднее содержание растворимого в H ₂ O ₂ элемента в ультраосновной породе ²		
		Cu	Ni	Cu/Ni	Cu	Ni	Cu/Ni
15	Рудник Алексо	0,4	2,2	0,18	15,2	1208	0,01
48	Район Сотмэн	—	2,7	низкое	6,3	884	< 0,01
2	Восточные районы	14,5	4,9	2,96	2,5	1125	< 0,01
4	Район Страти	4,8	2,8	1,71	251	587	0,43
10A	Рудный силл Лангмюр	—	6,9	низкое	40	742	0,05
14	Рудник Тексмонт	—	37	низкое	43,5	988	0,04
26	Рудник Марбридж	—	14,5	низкое	57,5	1570	0,04
30	Вернер — озеро Гордон	7,6	14,9	0,51	2500	4380	0,57
31	Бёрд-Ривер	4,6	14,3	0,32	263	882	0,30
38	Линн-Лейк	135	287	0,47	94,7	396	0,24
39A	Северный Шебандован	?	?	?	380	1350	0,28
41C	Рудный силл Буско	—	320	низкое	31	3330	< 0,01
43	Моак	?	?	?	221	4180	0,05
44A	Катиник	27	104	0,26	1180	7570	0,16
44B	Рэглап	26	116	0,22	651	2690	0,24
44C	Экспо	42	38	1,11	669	960	0,70
45	Найп-Лейк	?	?	?	122	895	0,14
47	Озеро Рензи	7,1	7,3	0,97	247	386	0,64

¹ Из табл. II.

² Из табл. IV.

ми ассоциирующих ультраосновных пород. На фиг. 7 и в табл. V видно, что существует общая тенденция к понижению медно-никелевого отношения в сульфидах из ультраосновных пород по сравнению с ассоциирующими рудными телами. На первый взгляд это удивительно, так как сульфиды, рассеянные в ультраосновных породах, должны частично выделяться позже, чем сульфиды, образовавшие рудное месторождение. Чемберлен [4] показал для интрузии Маскокс, что богатые никелем сульфиды выделяются прежде, чем никель-медные сульфиды. Возможное объяснение этой аномалии состоит в том, что рассеянные в ультраосновной породе сульфиды имеют больше возможностей для установления нового равновесия с богатыми никелем и бедными медью силикатами в процессе серпентинизации, чем сульфиды массивной сульфидной зоны. В процессах установления нового равновесия никель может концентрироваться в этих рассеянных сульфидах, поскольку он более халькофилен, чем железо, и понижать таким образом отношение меди к никелю. Если это объяснение правильно, можно было бы ожидать, что породы группы *безрудных* ультрабазитов будут иметь более низкое отношение меди к никелю, чем ультрабазиты *рудносной* группы, так как обогащение никелем при таком механизме будет относительно выше для пород, содержащих меньше суль-

фидов, что как раз и наблюдается. Если основываться на средних содержаниях меди и никеля в трех выделенных группах ультрабазитов, отношение меди к никелю составляет 0,234 для группы *рудносных* пород, 0,070 для группы пород с *незначительными* запасами руды, и 0,045 для группы *безрудных* пород. Следует подчеркнуть, что на это отношение будет влиять один негеологический фактор. Как было объяснено выше, некоторая часть никеля (будем надеяться, незначительная) выщелачивается из силикатных компонентов каждого образца. Это количество, в среднем оставаясь постоянным в пределах колебания содержаний сульфидов, с которыми приходилось иметь дело, вносит искусственное понижение отношения меди к никелю в пробах по мере уменьшения содержания сульфидов.

Если процессы, способствующие установлению нового равновесия, значительно изменяют отношения меди и никеля, то они должны также влиять и на отношения других металлов. Несколько более халькофильный кобальт должен обогащаться относительно никеля в породах с низким содержанием сульфидов, что в действительности и наблюдается. Оба эти элемента присутствуют в силикатах. Отношение кобальта к никелю в группе пород *рудносных* массивов составляет 0,045, возрастая до 0,052 в группе пород из тел с *незначительными* запа-

сами руды и до 0,075 в породах *безрудных* массивов. В результате изменения равновесия должно меняться и отношение никеля к железу, возрастающее от группы пород из *рудных* массивов к группе пород из *безрудных* тел. Хотя железо не определялось, мы можем изучить изменение отношения $(\text{Cu} + \text{Ni} + \text{Co}) : \text{S}$. Оно увеличивается от 0,41 в группе пород из *рудных* массивов до 0,53 в группе пород из массивов с *незначительными* запасами руды и до 1,10 в группе пород из *безрудных* тел. Понижение количества железа относительно меди, никеля и кобальта частично объясняет увеличение этого отношения. Другими причинами являются потеря серы и образование особых минералов с недостатком серы, таких, как хизлеудит Ni_3S_2 , или интерметаллических соединений, (например, аваруйт Ni_3Fe), которые, по крайней мере частично, растворимы в выщелачивающих растворах. Металлы, образующие эти соединения, могут извлекаться и из сульфидов и из силикатов [19].

Существенную информацию, имеющую научный и экономический интерес, дает сравнение содержаний металлов и отношений элементов по различным участкам, как показано на фиг. 2—6. Статья не предназначена для того, чтобы детализировать здесь эти сравнения. Однако имеются факты, которые следует отметить. В группе *пород* из *безрудных* тел пробы с содержаниями серы выше 0,178% (фиг. 5) распространены на участках Парри-Саунд — Хантсвилл, район Малартик, озеро Бурбо, район Кеногаминг и в поясе Томпсон (Харгрейв-Ривер, Рестинг-Лейк, *безрудный* силл Буско). Обогащение в поясе Томпсон не удивительно в связи с наличием здесь минерализации сульфидов меди и никеля. Ультраосновные породы района Малартик расположены вдоль заметно минерализованной зоны главного разлома, а пробы из участка озера Бурбо отобраны из района с широко распространенной медной минерализацией. Слабая пентландитовая минерализация известна в породах, опробованных в районе Кеногаминга. Особенность проб из участка Парри-Саунд — Хантсвилл состоит в высоком содержании выщелачиваемого кобальта. Среднее его содержание для этого участка составляет $99,1 \text{ млн}^{-1}$, что в три раза выше среднего содержания для всей группы и превышает только в породах трех участков группы *рудных* тел.

ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ ПОИСКОВ РУД

Поскольку четыре изученных элемента накапливаются в ультраосновных породах, с которыми ассоциируют руды, по сравнению с без-

рудными ультрабазитами мы можем рассмотреть, каким образом использовать это явление для прогноза рудоносности любых конкретных массивов ультраосновных пород.

Первое, на что следует обратить внимание, — это аналитическая производительность определения различных элементов. Для методов, используемых в настоящей работе, производительность при определении содержаний меди, никеля и кобальта примерно в 5 раз выше, чем производительность метода определения серы. Таким образом, при условии потери незначительной части информации практичность этого метода при поисках окажется значительно выше, если не будет определяться сера. Поэтому мы сначала изучили, какое значение имеют медь, никель и кобальт для разбраковки *рудных* и *безрудных* тел, а затем определили, какую дополнительную информацию дает сера.

Первым статистическим методом, использованным для этой цели, явился дискриминантный анализ. Он позволяет получать наилучшее сочетание переменных величин для разделения двух или нескольких групп образцов. Чтобы определить, к какой из двух групп наиболее близко подходит проба, сравнивают различные переменные величины одну за другой. Но легче и эффективнее объединить эти различные переменные величины в одну меру (дискриминантный отсчет) для каждой пробы, которую затем можно сравнивать с дискриминантным отсчетом каждой другой пробы. Дискриминантный анализ тем более эффективен, чем больше число переменных, которые сравниваются. При сравнении трех или четырех переменных применение дискриминантного анализа дает гораздо меньше преимуществ, чем при сравнении 20 или 30 переменных величин.

Дискриминантные равенства, описанные ниже, обчислены для наиболее достоверного отделения 616 проб *безрудных* ультраосновных пород от 372 проб группы *рудных* массивов. Метод дискриминантного анализа особенно хорошо описан Кули и Лонсом [5], а ранее был применен Камероном [2] для многомерных геохимических данных. Содержания элементов сначала переводились в логарифмы в связи с их высокой дисперсией. Матрицы W и A были затем обчислены по логарифмическим данным:

$$W_{ij} = \sum_{k=1}^g \left[\sum_{n=1}^{N_g} (\bar{x}_{ikn} - \bar{x}_{ik}) (\bar{x}_{jkn} - \bar{x}_{jk}) \right],$$

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^g N_g (\bar{x}_{ik} - \bar{x}_i) (\bar{x}_{jk} - \bar{x}_j),$$

где g — количество групп, N_g — количество проб в группе g , а i и j возрастают от 1 до p , где p — общее количество переменных величин.

С помощью матриц W и A формируется уравнение

$$W^{-1}A - \lambda I = 0,$$

где I — единичная матрица. Решением этого уравнения являются собственные числа λ , по которым вычисляют собственные векторы. Последние интерпретируются как дискриминантные функции. Для разделения двух групп вычисляется один собственный вектор. Чтобы исследовать значимость различий между составами этих двух групп, вычисляется λ :

$$\lambda = 1/(1 + \lambda),$$

где λ — собственное число, с которым ассоциирует соответствующий вектор, являющийся дискриминантной функцией. Лямбда исследуется аппроксимацией F по Рао [20]. Для двухгрупповой проблемы F вычисляется так:

$$F_{v,p} = [(1 - \lambda)/\lambda] (v/p),$$

где $v = N - p + 1$, N — число образцов, а p — число переменных. λ может также вычисляться как отношение рассеяния внутри тела к общему рассеянию. Таким образом, λ можно успешно использовать как меру различающей способности разных сочетаний переменных величин. Чем ниже значение λ , тем выше различающая способность этих переменных.

Чтобы показать относительную составляющую различных переменных в дискриминантном равенстве, умножением вектора дискриминантных коэффициентов на вектор квадратных корней диагонали матрицы W можно получить линейный дискриминантный вектор.

Для того чтобы различить пробы на *рудносные* и *безрудные* группы, используются в качестве переменных величин содержания меди, никеля и кобальта, при этом получают следующие значения:

Дискриминантный вектор 1 0,92Cu 0,37Ni, 0,08Co
Линейный вектор 1 22,6Cu 6,85Ni, 1,01Co

$$\lambda = 0,42, \quad \lambda = 0,70, \quad F_{93,4}^3 = 137, \quad p < 0,0001$$

Значения F и p указывают на высокую вероятность того, что указанные две группы различаются. Такая информация почти излишня, поскольку этот факт наблюдается визуально на фиг. 2—5. Более интересно, что линейный вектор показывает значительную роль меди при разделении на группы; кобальт играет очень малую роль. При сравнении графиков для четырех элементов (фиг. 2—5) или средних значений по группам (табл. IV) видно, что

кобальт показывает очень слабые относительные различия между группами *рудносных* и *безрудных* пород. Более того, поскольку коэффициенты его корреляции с другими элементами имеют среднюю и высокую величину, использование данных по кобальту становится излишним.

Очень значительные различия между группами *рудносных* и *безрудных* пород отражаются также и в различиях их ковариационных матриц (табл. VI), которые, как можно увидеть, использовать

Таблица VI
Ковариационные матрицы для групп *безрудных* и *рудносных* ультраосновных пород

	Группа безрудных пород				Группа рудносных пород			
	Cu	Ni	Co	S	Cu	Ni	Co	S
Cu	0,46	-0,07	0,05	0,11	0,85	0,23	0,16	0,39
Ni	-0,07	0,27	0,11	0,05	0,23	0,46	0,24	0,31
Co	0,05	0,11	0,15	0,07	0,16	0,24	0,16	0,18
S	0,11	0,05	0,07	0,20	0,39	0,31	0,18	0,46

зая методику, описанную Кули и Лонсом [5], заметно гетерогенны. Наиболее многовариантные анализы вариационного и ковариационного методов и методов дискриминантного анализа предполагают достаточную степень однородности в различных ковариационных матрицах. Андерсон и Бахадур [1] описали процедуру определения дискриминантного вектора для неравных ковариационных матриц. Программирование для «Фортран» опубликовано Рейментом и др. [21]. Используя этот метод, получаем следующий дискриминантный вектор:

Дискриминантный вектор 2 1,59Cu, 0,63Ni, 0,14Co

Хотя, на первый взгляд, кажется, что этот вектор отличается от дискриминантного вектора 1, преобразование двух векторов в процентные значения показывает другое:

1 67Cu, 27Ni, 6Co
2 66Cu, 29Ni, 5Co

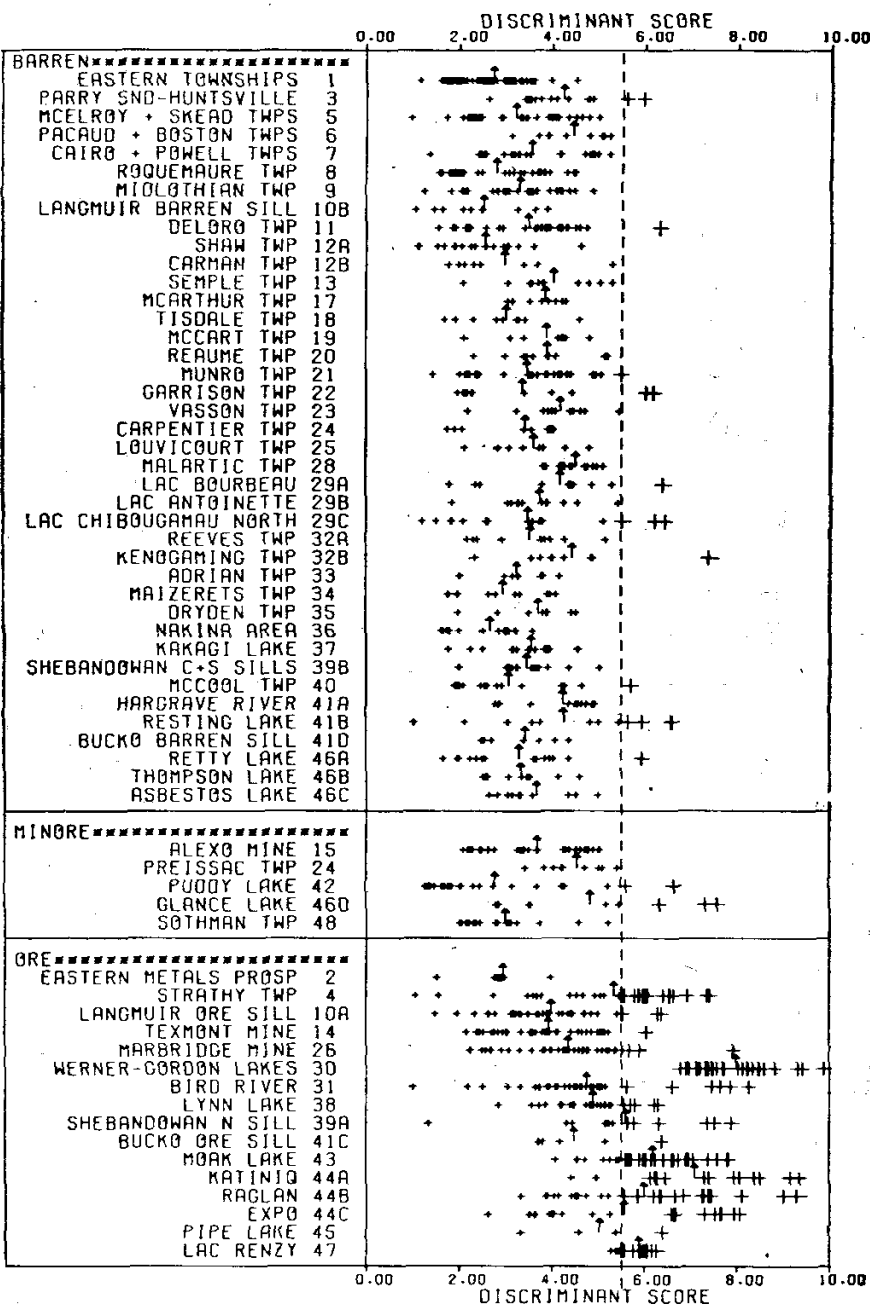
Если теперь мы включим в дискриминантный анализ серу (как lg содержания S), получатся следующие значения:

Дискриминантный 3 0,51Cu, 0,10Ni, -0,18Co, 0,84S
вектор

Линейный вектор 3 12,5Cu, 1,87Ni, -2,22Co, 14,3S

$$\lambda = 0,53, \quad \lambda = 0,65, \quad F_{93,3}^4 = 130, \quad p < 0,0001$$

Понижение значения λ относительно значения, ассоциирующего с дискриминантным вектором 1, показывает, что включением серы получено незначительное увеличение различаю-



ФИГ. 8. Распределение дискриминантных отсчетов, подсчитанных по меди, никелю и кобальту.

щей способности данных. Если мы вновь вычислим дискриминантный вектор методом Андерсона и Бахадура [1], то получим следующие коэффициенты:

Дискриминантный вектор $4 \ 1,04\text{Cu}, 0,20\text{Ni}, -0,37\text{Co}, 1,75\text{S}$

В процентном выражении различие между векторами 3 и 4 также невелико.

Значение λ было вычислено для всех возможных сочетаний переменных.

Ni—Co—S	0,70	Cu—Ni—Co—S	0,65
Cu—Ni	0,70	Cu—Ni—S	0,65
Ni—S	0,70	Cu—Co—S	0,65
Co—S	0,70	Cu—S	0,65
Cu—Co	0,71	Cu—Ni—Co	0,70
Ni—Co	0,91		

Из этого следует, что медь и сера имеют примерно одинаковое значение для разделения

групп *рудноносных* и *безрудных* пород, что никель имеет меньшее значение, а роль кобальта совсем мала. Совместная роль меди и серы в разделении двух групп такая же, как всех четырех элементов вместе.

Линейный дискриминантный отсчет можно вычислить для каждой пробы умножением дискриминантного вектора-строки (в I_g содержащий в этом случае) на вектор-столбец. Это было сделано для данных по пробам путем использования дискриминантного вектора (2). Дискриминантные отсчеты представлены на фиг. 8, а средние их значения для участков и групп приведены в табл. IV. На фиг. 8 по разделяющему значению 5,5 проведена линия, которая, видимо, наиболее достоверно отделяет распределение группы *безрудных* пород от верхней части распределения группы *рудноносных* пород. Значения на этой линии или справа от нее отмечены крупными крестами. По каждому участку были вычислены средние значения дискриминантных отсчетов; на фиг. 8 они помечены стрелкой, направленной вверх. Следует напомнить, что фиг. 8 является по существу логарифмической, поскольку содержания элементов перед вычислением дискриминантных отсчетов были переведены в логарифмы.

Из 616 образцов *безрудных* пород только 16 имеют значения дискриминантных отсчетов, равные или выше 5,5. Наоборот, значительная часть образцов из группы *рудноносных* пород имеет отсчеты, равные или превышающие 5,5. Исходя из этого, можно выделить многие рудносные массивы ультраосновных пород, особенно отличающиеся более крупными запасами рудного материала. Большинство участков с *незначительными* запасами более близки к группе *безрудных* пород. При проведении поисковых работ целесообразно детализировать изучение всех участков, пробы из которых показывают дискриминантные отсчеты выше 5,5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Anderson T. W., Bahadur R. R., Classification into Two Multivariate Normal Distributions with Different Covariance Matrices, Ann. Math. Statist., 33, 420—431, 1962.
2. Cameron E. M., Regional Geochemical Study of the Slave Point Carbonates, Western Canada, Can. J. Earth Sci., 6, 247—268, 1969.
3. Cameron E. M., Baragar W. R. A., Distribution of Ore Elements in Rocks for Evaluating Ore Potential, frequency distribution of copper in the Coppermine River Group and Yellowknife Group volcanic rocks, N.W.T., Canada, 1970.
4. Chamberlain J. A., Sulphides in the Muskox Intrusion, Can. J. Earth Sci., 4, 105—153, 1967.
5. Cooley W. W., Lohnes P. R., Multivariate Procedures for the Behavioral Sciences, John Wiley and Sons, New York, 1962.

6. *Cornwall H. R.*, Nickel Deposits of North America, U.S. Geol. Surv. Bull., 1223, 62, 1966.
7. *Добин Д. А.*, Некоторые закономерности распределения микроэлементов в траппах гор Хараелах, Тр. научн.-исслед. ин-та геол. Арктики, 168, 1963.
8. *Доливо-Добровольский В. В.*, *Клименко Ю. В.*, Рациональный анализ руд, Metallurgizdat, Свердловск, 1947.
9. *Годлевский М. Н.*, Траппы и рудоносные интрузии Норильского района, Госгеолтехиздат, М., 1959.
10. *Goldschmidt V. M.*, Geochemistry, ed. Alex Muir, Clarendon Press, Oxford, 730, 1954.
11. *Kilburn L. C.*, *Wilson H. D. B.*, *Graham A. R.*, *Ogura Y.*, *Coats C. J. A.*, *Scoates R. F. J.*, Nickel Sulphide Ores Related to Ultrabasic Intrusions in Canada, Symposium, Magmatic Ore Deposits, ed. H. D. B. Wilson, Econ. Geol. Publ. Co., 276—293, 1969.
12. *Kullerud G.*, *Yoder H. S., Jr.*, Sulphide-Silicate Reactions and their Bearing on Ore Formation under Magmatic, Postmagmatic and Metamorphic Conditions, Symposium, Problems of Postmagmatic Ore Deposition, 2, 327—331, Geol. Surv. Czechoslovakia, Prague, 1965.
13. *Laurin A. F.*, *Dugas J.*, Current Mining Exploration and Development in Quebec, Can. Min. J., 91, 66—69, 1970.
14. *MacKenzie B. W.*, Nickel — Canada and the World, Mineral Rept. № 16, Mineral Resources Div., Dept. Energy, Mines and Resources, Ottawa, 176, 1968.
15. *Naldrett A. J.*, The Role of Sulphurization in the Genesis of Iron-Nickel Sulphide Deposits of the Porcupine District, Ontario, CIM Bulletin, 59, 489—497, CIM Transactions, 69, 147—155, 1966.
16. *Полферов Д. В.*, Геохимические поиски месторождений медно-никелевых сульфидных руд, Бюлл. научн.-техн. информ., Мин. геол. и охраны недр СССР, № 1 (35), 1962.
17. *Полферов Д. В.*, *Суслова С. И.*, *Архинова А. И.*, Определение перспектив рудоносности основных — ультраосновных массивов на основании закономерностей первично-конституционального рассеяния, Тр. научн.-исслед. ин-та геол. Арктики, сер. региональная, № 5, 1965.
18. *Polferov D. V.*, *Suslova S. I.*, Geochemical Criteria of Nickel Mineralization in the Mafic-Ultramafic Massifs, Geochemistry International, 3, 487—496, 1966.
19. *Ramdohr P.*, A Widespread Mineral Association, Connected with Serpentinization, N. Jb. Miner. Abstr., 107, 241—265, 1967.
20. *Rao C. R.*, Advanced Statistical Methods in Biometric Research, John Wiley & Sons, New York, 1952.
21. *Reyment R. A.*, *Ramden H.-A.*, *Wahlstedt W. J.*, Fortran IV Program for the Generalized Statistical Distance and Analysis of Covariance Matrices for the CDC 3600 Computer, Computer Contribution 39, State Geol. Surv., U. Kansas, Lawrence, 42, 1969.
22. *Sen Gupta J. G.*, Rapid Combustion Methods for Determining Sulfur in Rocks, Ores and Stony Meteorites, a comparative study of the usefulness of resistance-type and induction furnaces, Anal. Chim. Acta, 49, 519—525, 1970.
23. *Shankla R.*, Copper, Nickel, Lead and Zinc Deposits of Ontario, Mineral Resources Circ., 12, Ontario Dept. Mines, 394, 1969.
24. *Skinner B. J.*, *Peck D. L.*, An Immiscible Sulphide Melt from Hawaii, Symposium, Magmatic Ore Deposits, ed., H.D.B. Wilson, Econ. Geol. Publ. Co., 310—322, 1969.
25. *Smirnova N. P.*, *Nesterenko G. V.*, *Al'mukhamedov A. I.*, The Mode of Occurrence of Nickel and Cobalt in Mafic Rocks, Geochemistry International, 5, 363—372, 1968.
26. *Sullivan C. J.*, The Origin of Massive Sulphide Ores, CIM Bulletin, 52, 613—619, 1959.
27. *Turekian K. K.*, *Wedepohl K. H.*, Distribution of the Elements in Some Major Units of the Earth's Crust, Bull. Geol. Soc. Am., 72, 175—192, 1961.
28. *Волков И. Д.*, Распределение микроэлементов в горных породах Норильского района, в сб. «Вопросы магматизма, метаморфизма и рудообразования». Госгеолтехиздат, М., 1963.
29. *Wager L. R.*, *Vincent E. A.*, *Smales A. A.*, Sulphides in the Skaergaard Intrusion, East Greenland, Econ. Geol., 52, 855—895, 1957.
30. *Wilson H. D. B.*, *Brisbin W. C.*, Regional Structure of the Thompson — Moak Lake Nickel Belt, CIM Bulletin, 54, 815—822, CIM Transactions, 64, 470—477, 1961.
31. *Wilson H. D. B.*, *Kilburn L. C.*, *Graham A. R.*, *Ramlal K.*, Geochemistry of Some Canadian Nickeliferous Ultrabasic Intrusions, Symposium, Magmatic Ore Deposits, ed., H. D. B. Wilson, Econ. Geol. Publ. Co., 294—309, 1959.
32. *Егорова Е. Н.*, О никеленосности оливина, Записки ВМО, ч. 67, вып. 2, 1938.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕДКИХ И РАССЕЯННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В БИОТИТЕ ИЗ КВАРЦЕВЫХ МОНЦОНИТОВ, АССОЦИИРУЮЩИХ С КОНТАКТОВО-МЕТАСОМАТИЧЕСКИМИ ВОЛЬФРАМОВО-МОЛИБДЕНОВО-МЕДНЫМИ РУДАМИ, КАЛИФОРНИЯ, США

Р. Дарлинг
 Политехническая школа,
 Монреальский университет

ВВЕДЕНИЕ

Изученная площадь расположена приблизительно в 480 км восточнее Сан-Франциско и в 48 км северо-западнее Бишоп, Калифорния.

Месторождение Пайн-Крик выбрано для изучения на основании аналитических данных, которые показывают в некоторых рудах хорошую корреляцию между вольфрамом и фтором [3]. Предполагается, что эти два элемента переносились и отлагались в процессе рудообразования совместно. Поэтому распределение вольфрама и фтора может отражать рудообразующий процесс и служить поисковым признаком.

Биотит, наиболее важный фторсодержащий минерал в кварцевых монцонитах, был выделен из проб, отобранных из поверхностных и подземных выработок для анализа на фтор (продукты сепарации биотита были подготовлены для эмиссионного спектрального анализа на фтор, так как автор вначале не имел возможности пользоваться микрозондом). Когда анализы биотита на фтор показывали, что состав биотита отражает присутствие близлежащей руды, продукты сепарации анализировались на двадцать других редких и рассеянных элементов.

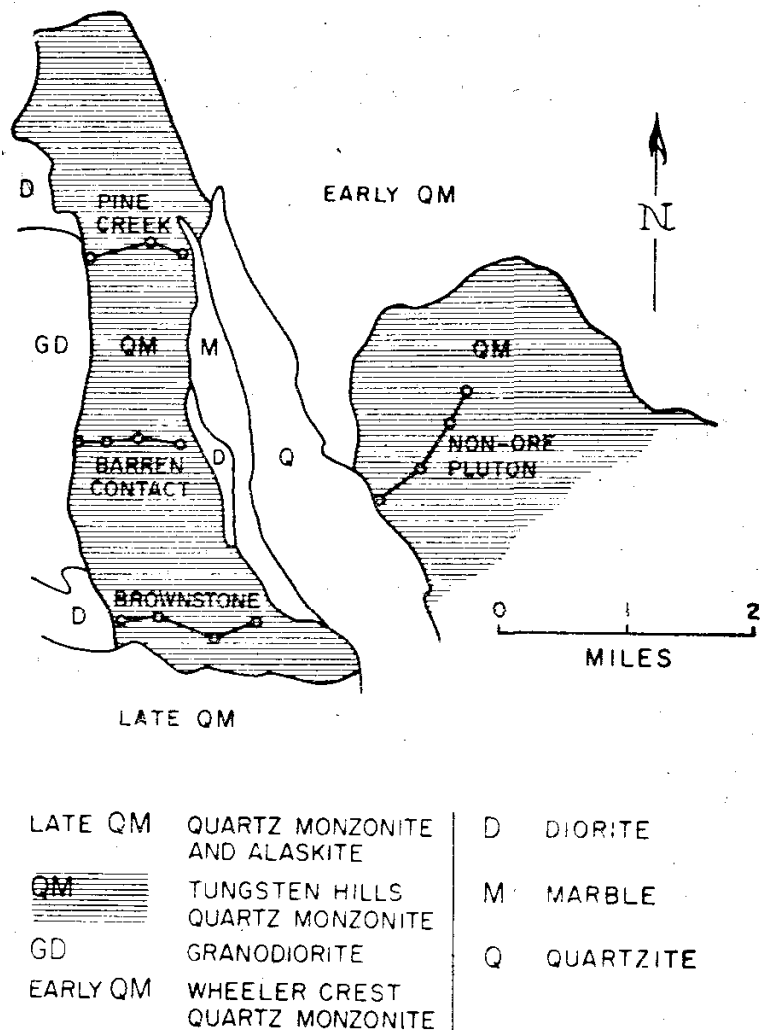
ГЕОЛОГИЯ И РУДНЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Для настоящего краткого обобщения использовано полное описание региональной геологии, выполненное Бэйтмэном [1], и геологии месторождений, опубликованной Греем [3]. Наиболее древними образованиями в районе Бишоп-Тангстен являются палеозойские метаосадочные и метавулканические породы, состоящие из отторженцев, септы и ксенолиты в меловых интрузивных породах батолита Сьерра-Невада. Интрузивные породы представлены габбро, диоритами, гранодиоритами, кварцевыми диоритами, кварцевыми монцонитами, аплитами и пегматитами.

Контактово-метасоматические вольфрамовые месторождения приурочены к контакту известковистых метаосадочных и интрузивных пород, главным образом к их гранитным разностям. Руды района ассоциируют преимущественно с однофазными плутонами: более 90% добычи вольфрама поступает из 75% месторождений, расположенных на контакте с кварцевыми монцонитами батолита Тангстен-Хилс.

На изученной территории (фиг. 1), в северной части месторождения Пайн-Крик, отторженец кровли, сложенный мраморами и кварцитами, зажат между двумя плутонами кварцевых монцонитов Тангстен-Хилс. С показанной на фиг. 1 частью восточного плутона руденение не связано, поэтому она была выделена как «безрудный плутон». Западный плутон кварцевых монцонитов Тангстен-Хилс получил название «рудного». У его восточной границы на контакте с мраморами находятся два вольфрамовых рудника. Рудник Пайн-Крик, расположенный в северной части, значительно больше других и является крупнейшим в районе Бишоп. Отдельные рудные штоки этого рудника расположены вдоль его самой северной части в 1300 м от контакта кварцевых монцонитов с мраморами, определяющими западную кромку висячей кровли месторождения Пайн-Крик. На участке этого контакта между рудником Пайн-Крик и рудниками Браунстон, где мраморы и кварцевые монцониты разделены узким клином диоритов, руда не обнаружена.

В рудных столбах месторождения Пайн-Крик местами наблюдается отчетливый структурный контроль, который позволяет предположить, что они были отложены из рудных растворов, двигавшихся вверх вдоль контакта мраморов и кварцевых монцонитов. Однако при изучении рудных тел, например южного, описанного Бэйтмэном [1], или рудного тела, изученного Греем [3], становится очевидным, что в их формировании участвовали процессы горизонтальной миграции через кварцевые монцониты, по крайней мере для некоторых элементов. Таким образом, возможно, что хотя бы



ФИГ. 1. Геология и места отбора проб на поверхности.

для этих элементов механизм рудообразующего процесса соответствовал «латераль-секреционному типу». Предполагалось определить влияние этого процесса на состав биотита, располагавшегося на путях миграции.

Детальный химизм руд и, таким образом, данные о привносе элементов при рудообразовании не известны. Путем сравнения анализов руд и мраморов Бэйтмэн [1] показал, что кремний, алюминий, железо, марганец, магний, сера, фтор, вольфрам, молибден и медь привносились в мраморы при образовании тактитовых руд. Однако, к сожалению, сведения, касающиеся других редких элементов, отсутствуют.

ОПРОВОБОВАНИЕ И ОБРАБОТКА ПРОБ

Места взятия проб на поверхности показаны на фиг. 1, пункты подземного опробования приведены в табл. I. Всего было отобрано 44 пробы кварцевых монзонитов весом 500—700 г. Были приложены усилия для получения представительных проб. Это не составило больших трудностей, так как породы были достаточно однородны. Пробы, взятые с поверхности, отбирались из неветрелого материала.

Таблица I

Схема размещения околорудных проб из подземных выработок

Профиль	Место взятия проб
9	Напротив богатой Мо руды, горизонт 500 м
12	Кромка висячей кровли, горизонт 1500 м (нормальная руда)
13A, 13B	Вкrest изгиба, в контакте, горизонт 1500 м А—около рудного тела нормальной мощности Б—около широкой части рудной зоны
18	Напротив широкой рудной зоны, горизонт 1100 м Руда, богатая Cu, W

Все пробы были раздроблены в четырехдюймовой щековой дробилке из марганцовистой стали, затем в полудюймовой конической дробилке со стальными дробящими поверхностями и в дисковом истирателе с пластинами из окиси алюминия. Пробы (около 95%), истертые до —20 меш, перемешивались, и затем ручным магнитом из них выделяли магнетит и осколки железа. Потом все пробы были дважды пропущены через магнитный сепаратор Карпко, в результате чего около 90% содержащегося в них биотита было выделено в магнитную фракцию.

Биотитовые продукты сепарации, полученные из проб, отобранных в подземных выработках, затем дополнительно очищались при помощи магнитного сепаратора Франца, сепарации в бромформе и тяжелых жидкостях, затем размалывались в шаровой мельнице из карбида вольфрама и перемешивались. Операции следовали в таком порядке: магнитная сепарация (Франц), сепарация в бромформе и иодистом метиле.

Биотитовые продукты сепарации из поверхностных проб пропускались, кроме того, через латунные сита для выделения фракции 42—60 меш. Эта фракция дважды пропускалась через сепаратор Франца и очищалась с помощью бромформа и иодистого метиле.

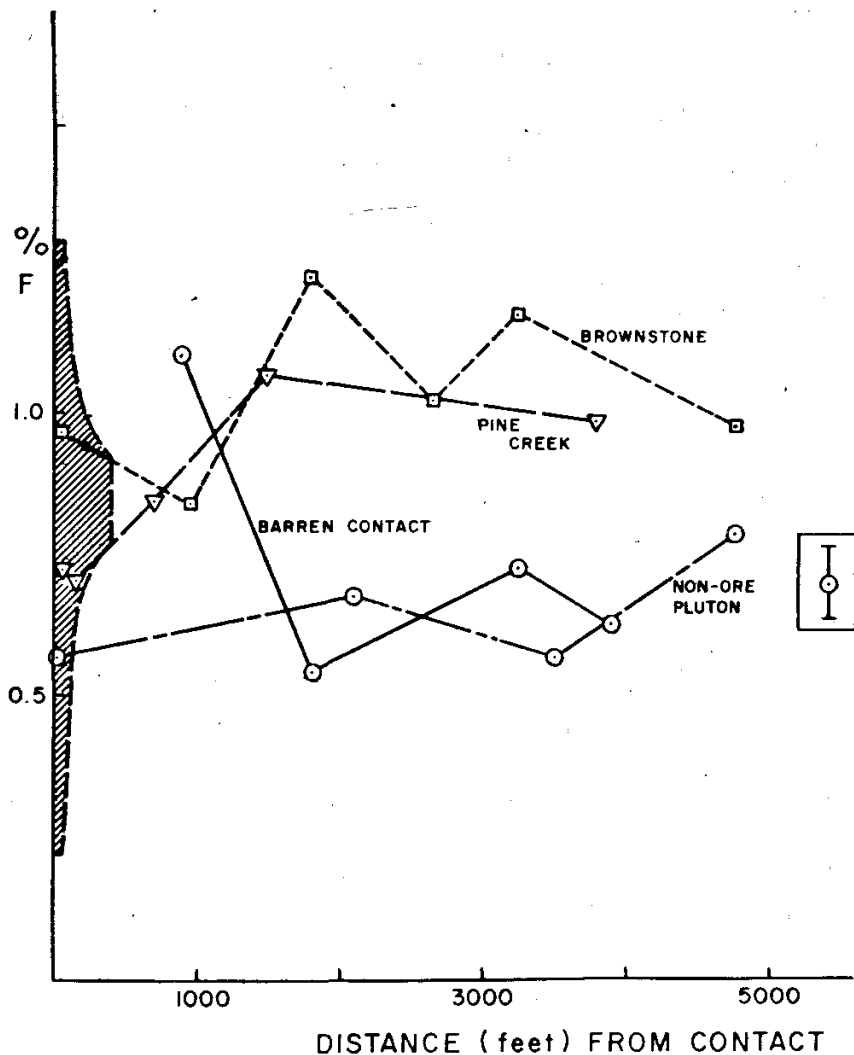
АНАЛИЗЫ

Из продуктов сепарации биотита изготавливались полированные шлифы, которые анализировались с помощью микроанализатора на фтор, а затем количественно анализировались на 20 редких и рассеянных элементов и качественно — на три элемента методом оптической эмиссионной спектроскопии. Детально аналитические методы изложены Дарлингом [2].

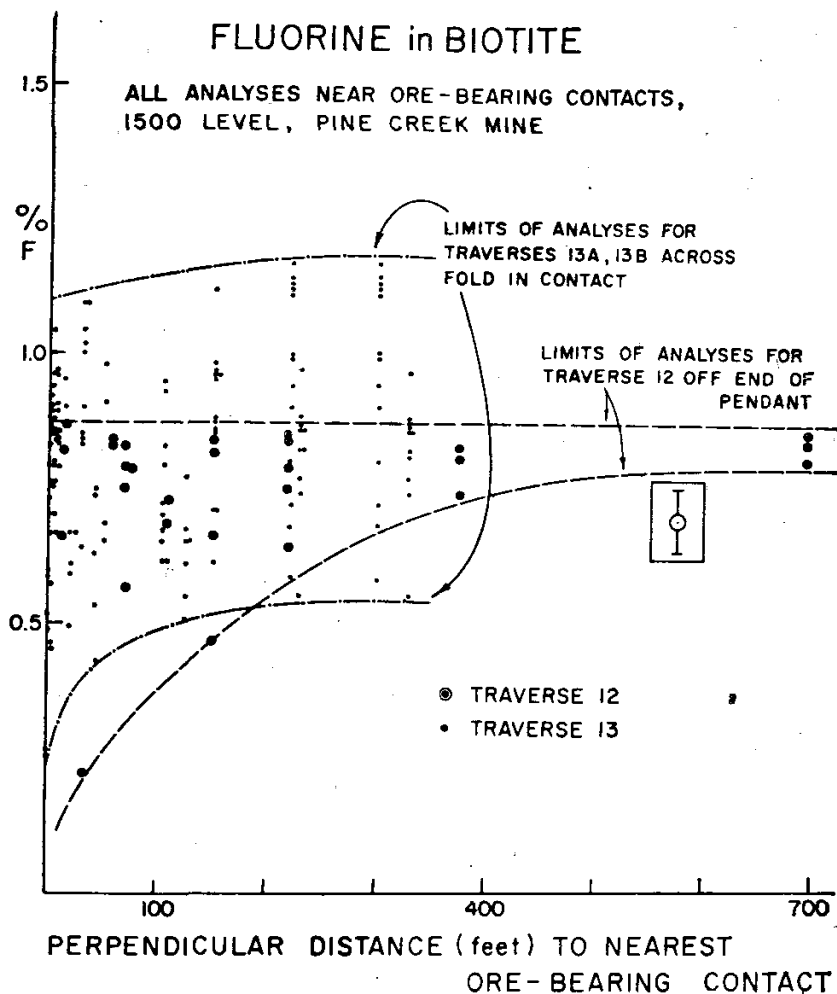
РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗОВ

Фтор. На фиг. 2 показано среднее содержание фтора в биотитах из проб, взятых с поверхности. Здесь отчетливо выявляются постоянно низкие содержания в безрудной части массива и значительно более высокие в пробах, отобранных по двум профилям, пересекающим рудные зоны Пайн-Крик и Браунстон. Это различие устанавливается особенно отчетливо, если рассматривать только результаты по пробам, удаленным от контакта. Штриховкой в левой части фиг. 2 (и на других аналогичных фигурах) показан участок, на котором брались пробы вблизи руды из подземных выработок на руднике Пайн-Крик. Сравнивая результаты анализов поверхностных проб и проб, взятых с рудника Пайн-Крик, можно заметить уменьшение среднего содержания фтора по мере приближения к рудному контакту. Подобное резкое уменьшение в безрудном массиве не наблюдается.

На фиг. 3 уменьшение содержания фтора вблизи руды иллюстрируется результатами анализа проб, взятых при подземных пересечениях. Каждое пересечение показывает один и тот же верхний предел, равный первичному содержанию



ФИГ. 2. Содержание фтора в биотите из поверхностных проб (вариации в широких пределах).

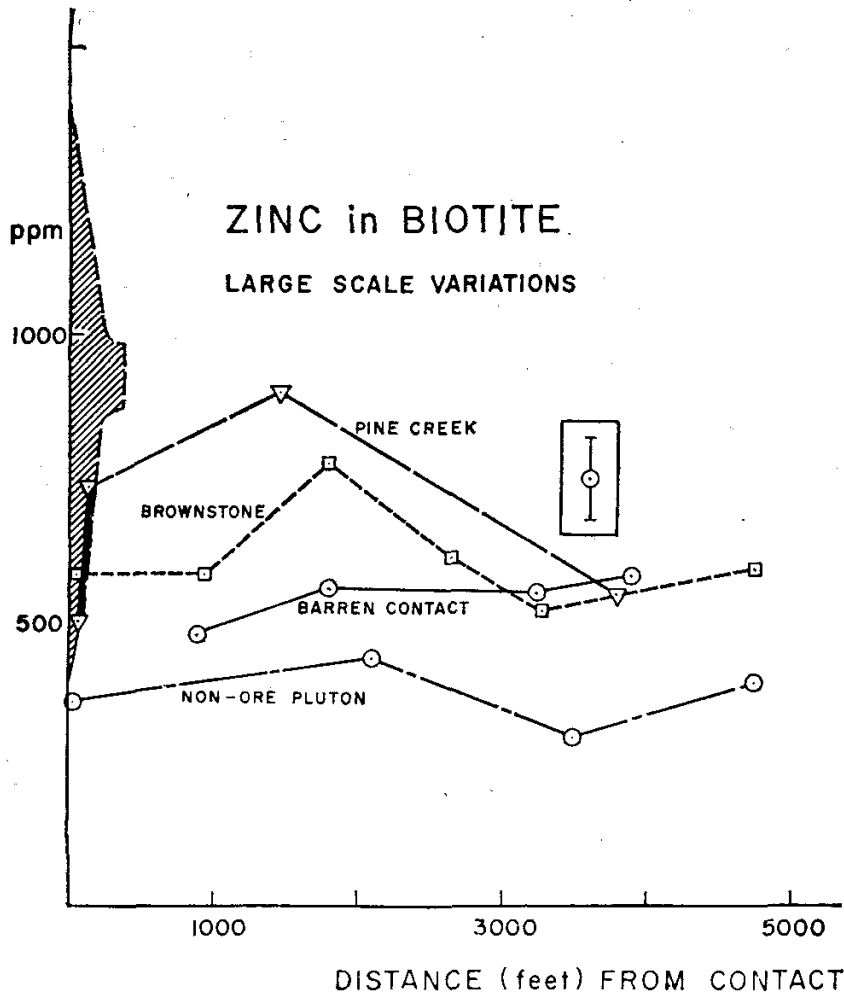


ФИГ. 3. Содержание фтора в биотите вблизи руды, горизонт 1500, рудник Пайн-Крик.

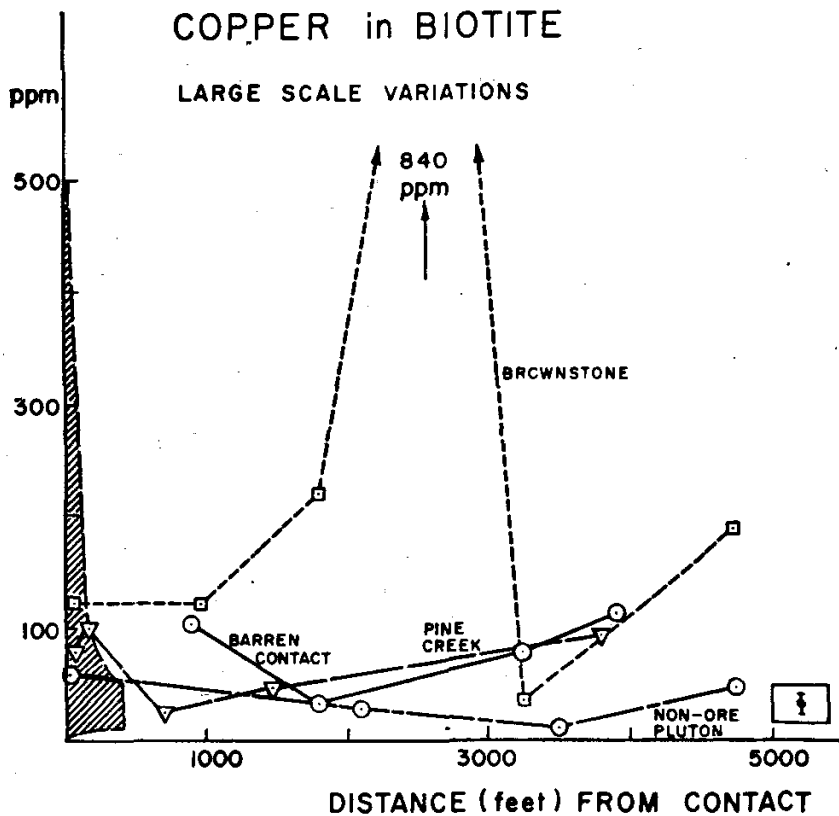
Стрелкой вверх показаны пределы содержаний для профилей 13А, 13В вкост складки в контакте; стрелками вниз показан предел содержаний для профиля 12 окончания висячего блока.

нию фтора в биотите, не измененному под влиянием рудообразующего процесса. По мере приближения к контакту содержание фтора в биотите непрерывно уменьшается. Потеря фтора видимо обусловлена его выщелачиванием в процессе рудообразования. Интенсивность выщелачивания отражается различием между верхним и нижним пределами содержаний, увеличиваясь по мере приближения к рудосодержащему контакту.

Интересно отметить, что уменьшение содержания фтора совпадает с интенсивностью рудного и окolorудного процессов, что проиллюстрировано двумя профилями опробования. Пробы, которые отобраны на профиле 12, проходящем северо-западнее рудника Пайн-Крик, и взяты из пород, окруженных кварцевыми монцонитами, показывают меньшую степень выщелачивания фтора по мере приближения к рудной зоне. Профиль 13, пересекающий переслаивание мраморов с кварцевыми монцонитами и окруженный с трех сторон минерализованными контактами, обнаруживает по мере приближения к контакту резкое уменьшение содержания фтора во всех трех направлениях.



ФИГ. 4. Содержание цинка в биотите из поверхностных проб (вариации в широких пределах).



ФИГ. 5. Содержание меди в биотите из поверхностных проб (вариации в широких пределах).

Цинк. Содержание цинка в биотите из поверхностных проб кварцевого монцонита (фиг. 4) равномерно увеличивается и может быть

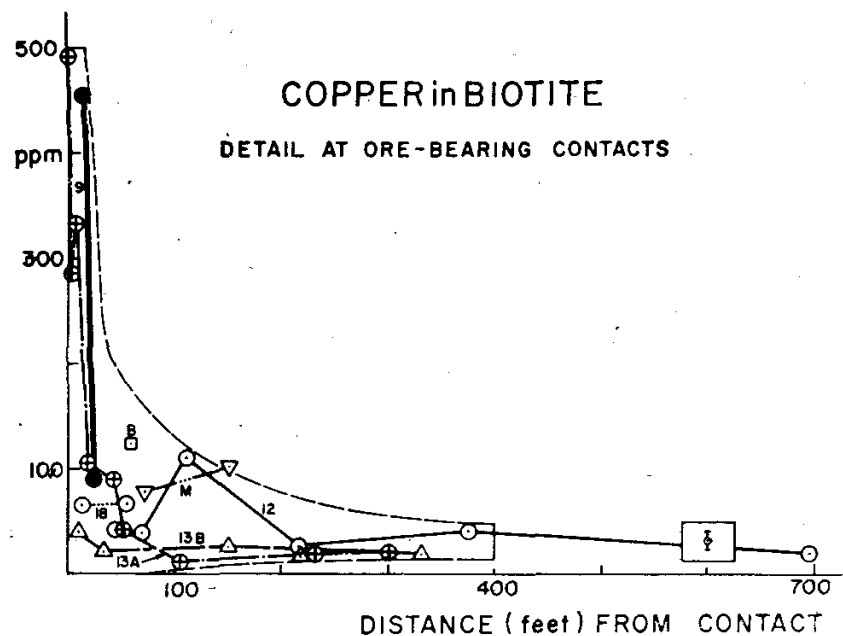
названо «рудноносным потенциалом» кварцевых монцонитов. Содержание цинка оказалось минимальным для безрудного плутона, выше для безрудного контакта рудоносного плутона и максимальным для профилей пересекающих небольшое месторождение Браунстон и гораздо более крупное месторождение Пайн-Крик.

При детальном изучении рудоносного контакта не выявлено равномерное увеличение или уменьшение содержания цинка в биотите по мере приближения к рудной зоне.

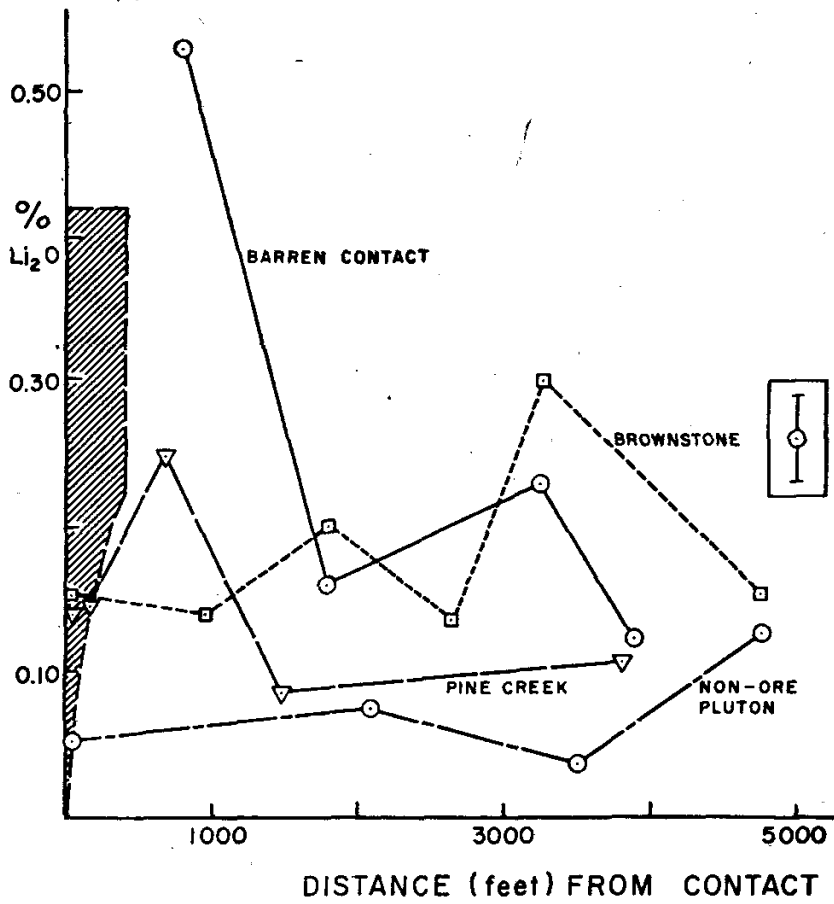
Медь. Как показано на фиг. 5, содержание меди в биотите безрудного плутона постоянно низкое. Повышенные и изменчивые содержания меди характерны для всех поверхностных пересечений. Крайне высокое содержание меди в пробе из рудника Браунстон, вероятно, объясняется включениями халькопирита в биотите. Было установлено, что некоторые фракции биотита, взятые из проб околорудного контакта, содержали микроскопические включения халькопирита.

Содержание меди в биотите вблизи руды показано на фиг. 6. Здесь отмечается заметное увеличение содержания меди для профиля 9 (руда с высоким содержанием молибдена) и профиля 13А (нормальная мощность нормальной руды) по мере приближения к руде. Однако для проб из других пересечений такой характер увеличения содержания меди не наблюдается и, во всяком случае, не столь очевиден.

Ванадий. Биотиты из проб, взятых с поверхности, характеризуются выдержанными высокими содержаниями ванадия в пересечениях, удаленных от пустого контакта рудного плутона, низкими содержаниями в безрудном плутоне и промежуточными, но резко колеблющи-



ФИГ. 6. Содержание меди в биотите вблизи руды (деталь рудного контакта).



ФИГ. 7. Содержание лития в биотите из поверхностных проб (вариации в широких пределах).

мися содержаниями в двух пересечениях через рудники.

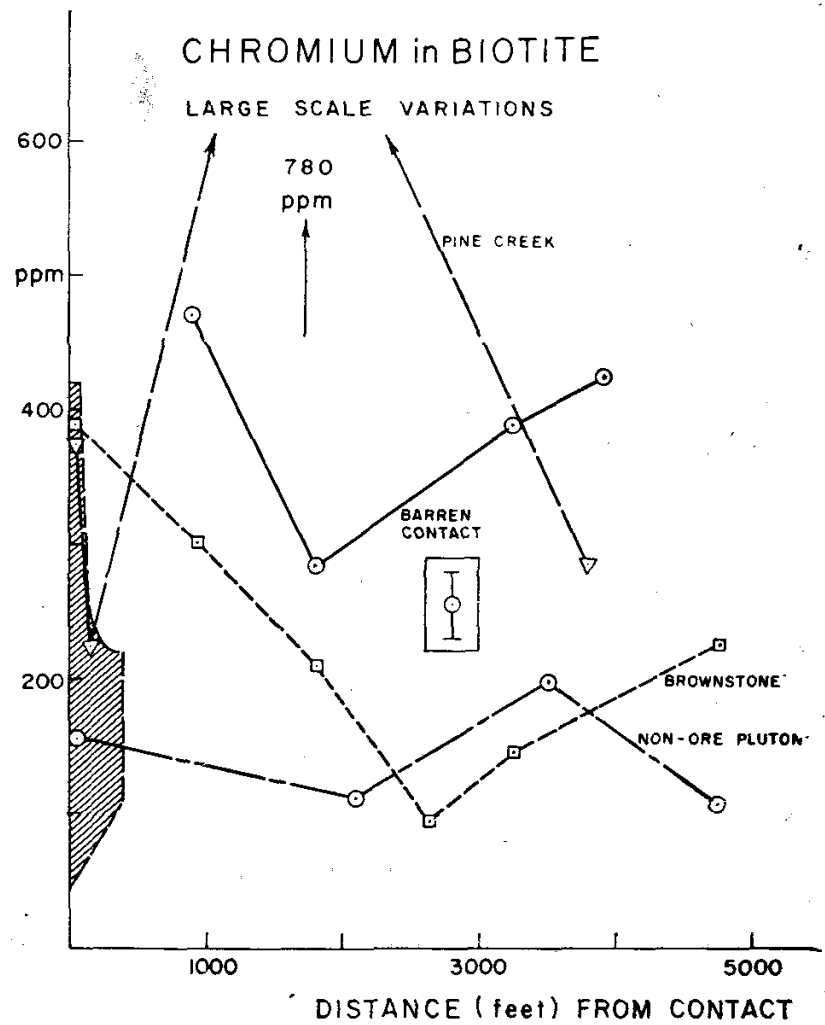
Анализ биотита из проб, взятых вблизи руды показал противоречивые результаты. Профиль, пройденный по поверхности в районе Пайн-Крик и подземный профиль 13 свидетельствуют о повышении содержащий ванадия по мере приближения к руде, но подземный профиль 12 показал обратную тенденцию.

Литий. На фиг. 7 изображено содержание лития в биотите из проб, отобранных с поверхности. Результаты для безрудного плутона постоянно низкие; для рудного плутона содержания лития выше и более резко меняются. Результаты анализа биотита, отобранного вблизи руды, не показывают закономерных изменений по мере приближения к руде.

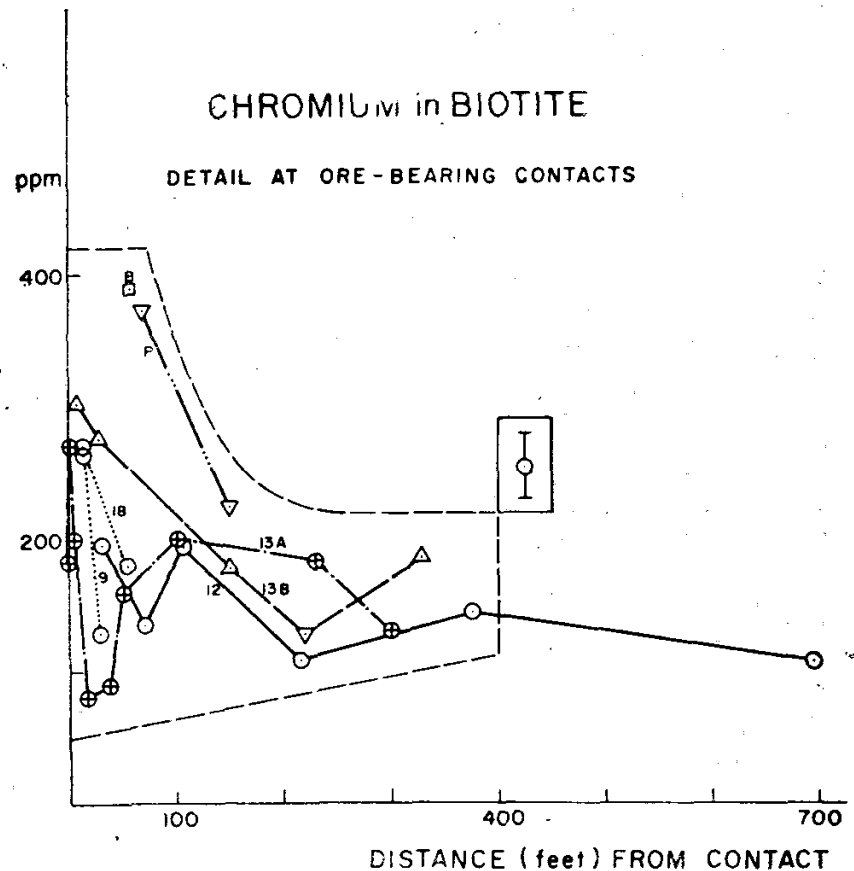
Хром. Содержания хрома в биотите из поверхностных проб (фиг. 8) для безрудного плутона низкие; по рудному плутону содержания выше и более резко меняются во всех разрезах.

Возможно, что это обычное увеличение содержания хрома в биотите вблизи руды. Без дополнительного опробования такой вывод обосновать трудно. На фиг. 9 подобное увеличение отмечается только для подземных пересечений 9, 18 и 13В и поверхностного пересечения через месторождение Пайн-Крик.

Серебро. Серебро не добавлялось в стандарты, использованные при калибровке в спек-



ФИГ. 8. Содержание хрома в биотите из поверхностных проб (вариации в широких пределах).



ФИГ. 9. Содержание хрома в биотите вблизи руды (деталь рудного контакта).

тральных анализах, и поэтому в биотите могли быть измерены только относительные количества серебра. В качестве единицы измерений в целях сравнения использовалось отношение интенсивности спектральных линий серебра и палладиевого внутреннего стандарта.

Содержание серебра в биотите в поверхностных пробах, как правило, низкое вблизи пустого контакта рудного плутона и несколько более высокое во всех других профилях. В рудных контактах содержание серебра в биотите резко увеличивается (по подземным пересечениям 9 и 13А); для других пересечений оно существенно не меняется.

Скандий. Содержание скандия в биотите из поверхностных проб наименьшее в пересечениях через пустые контакты рудного плутона и несколько выше в других поверхностных пересечениях.

По мере приближения к рудному контакту наблюдается возрастание содержания скандия в биотите вдоль некоторых пересечений и, возможно, уменьшение в поверхностном пересечении через месторождение Пайн-Крик.

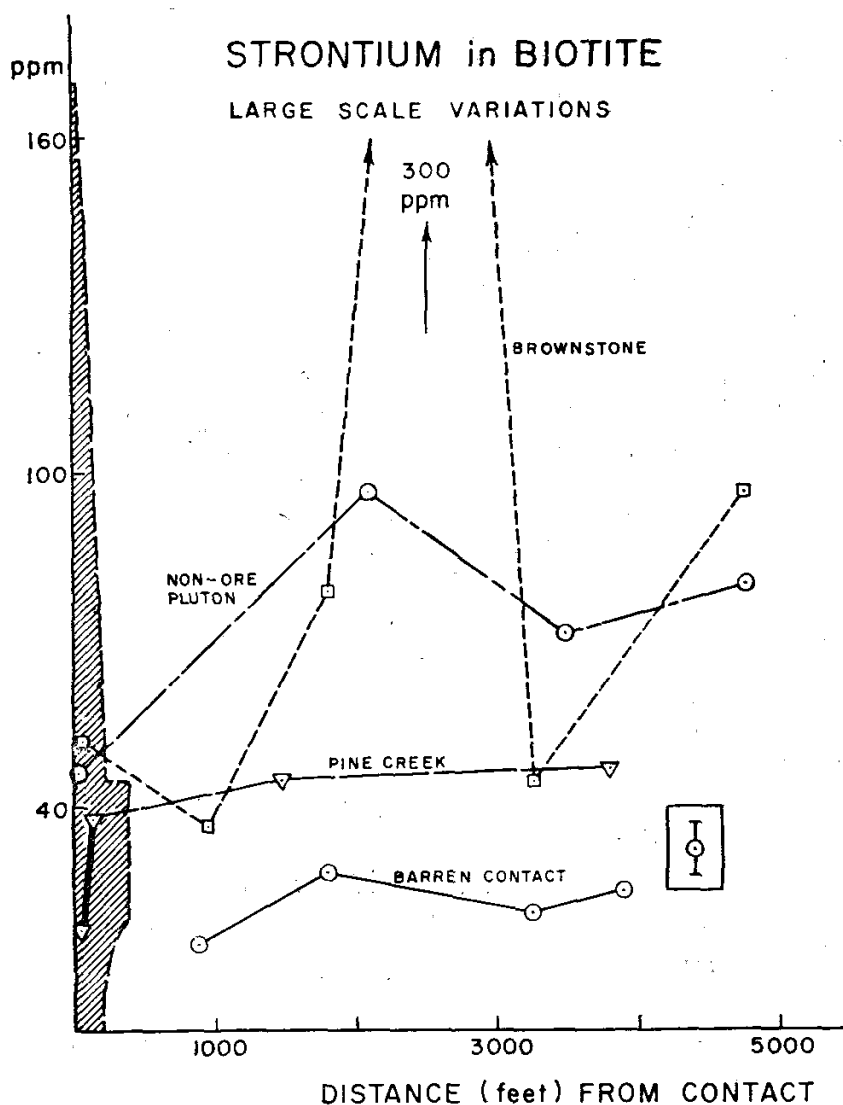
Стронций. В распределении стронция в биотите из поверхностных проб бросается в глаза (фиг. 10) его постоянно низкое содержание в биотите из пересечений безрудных контактов рудного плутона. Во всех остальных поверхностных пересечениях содержание стронция более высокое и меняется несколько более резко.

На фиг. 11 показано, что содержание стронция в биотите в некоторых пересечениях вблизи руды повышается (9, 13А), но это возрастание неравномерное и может быть обнаружено только при детальном опробовании.

Натрий. Если рассматривать пробы, взятые только вдали от контакта, натрий содержится в наименьшем количестве в биотите из пересечений через пустые контакты рудного плутона и в большем количестве в биотитах из безрудного плутона. Биотит из двух пересечений через рудник дает промежуточные величины. Вблизи рудосодержащего контакта наблюдается тенденция к уменьшению содержания натрия в биотите, однако это уменьшение непостоянно и наблюдается не во всех пересечениях.

Иттрий. Содержание иттрия в биотите из поверхностных проб (вдали от контактов) наиболее высокое для безрудных плутонов. Минимальные содержания были отмечены для пересечений через безрудные контакты рудного плутона. По двум пересечениям через рудники установлены промежуточные значения для рассмотренных выше случаев.

Содержание иттрия в биотите увеличивается



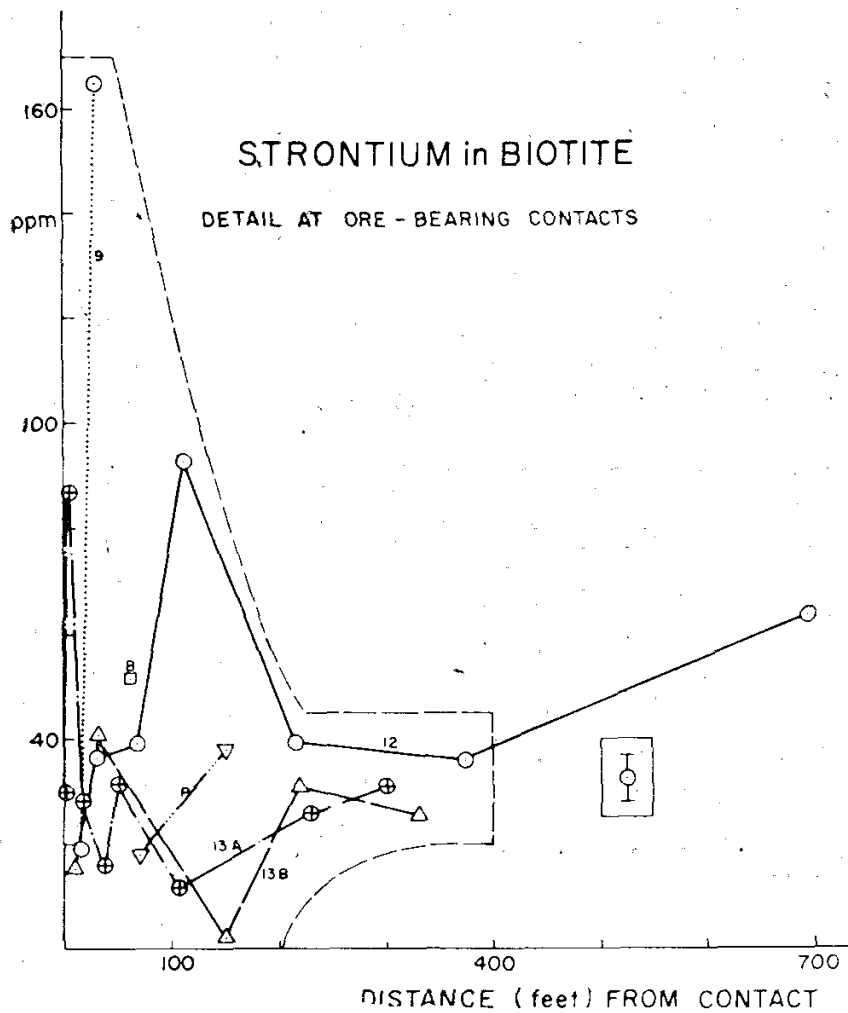
ФИГ. 10. Содержание стронция в биотите из поверхностных проб (вариации в широких пределах).

по направлению к руде по двум пересечениям [9, 12], но в других пересечениях вблизи руды систематического изменения не наблюдается.

Иттербий. Вдали от контактов содержание иттербия в биотите наиболее высокое для безрудных плутонов и минимальное — для рудного плутона на участке между безрудными контактами. Два пересечения через рудники дают промежуточные значения. Вблизи руды содержание иттербия в биотите не проявляет закономерных изменений.

Бор и висмут. Бор и висмут были определены лишь в небольшом количестве проб вблизи руды. Только в пяти пробах были отмечены содержания бора более 3 млн^{-1} . Висмут в количествах более 2 млн^{-1} обнаружен только в семи пробах.

Другие элементы. Из других элементов в биотите обнаружены никель, титан, олово, молибден, лантан, галлий, свинец и марганец. Ни один из этих элементов не показал систематических различий в биотите из поверхностных пересечений или отчетливых изменений содержания по мере приближения к руде.



ФИГ. 11. Содержание стронция в биотите вблизи руды.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Микроэлементы, содержания которых в биотитах как в плутоне, так и за его пределами проявляют определяемые вариации в связи с присутствием оруденения, могут быть разделены на следующие четыре группы.

1. Элементы, наименее распространенные (обычно присутствующие в постоянно низких количествах) в биотите из безрудного плутона. К ним относятся фтор, цинк, медь, ванадий, литий и хром. При этом содержание фтора вблизи руд уменьшается, а меди, ванадия и хрома увеличивается.

2. Элементы, менее распространенные в биотите из участков рудного плутона вблизи безрудных контактов, содержание которых увеличивается вблизи руды. К ним относятся серебро, скандий и стронций.

3. Элементы, которые наиболее распространены в биотите из безрудного плутона и в меньших количествах содержатся в биотите из рудного плутона вблизи безрудных контактов. В эту группу входят натрий, иттрий и иттербий, причем содержание иттрия может увеличиваться по направлению к руде.

4. Бор и висмут, обнаруженные только в небольшом количестве вблизи руды.

Необходимо отметить, что при предварительном изучении контакта безрудного плутона была взята только одна проба, а вблизи пустого контакта рудного плутона пробы не отбирались. Таким образом, изменения в химизме биотита, выявленные при детальном опробовании рудных контактов, могут быть связаны с присутствием руды, но, прежде чем утверждать это, необходимо произвести аналогичное детальное опробование пустых контактов.

Другим недостатком этого исследования является малочисленность информации о статистической ошибке опробования. Однако если в большинстве проб или во всех пробах одного пересечения содержания выше либо ниже содержания в большинстве проб или во всех пробах другого пересечения, то различия, видимо, значимые. Поэтому изменения содержаний фтора, цинка, меди, ванадия, лития, натрия и иттербия внутри плутона и различия в содержаниях стронция, натрия и иттербия между плутонами можно считать действительными.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Некоторые результаты этого исследования могут быть использованы при разведке контактово-метасоматических вольфрамовых месторождений района Бишоп.

При выборе плутона для постановки дальнейших разведочных работ могут быть использованы критерии, перечисленные в табл. II. В частности, содержания фтора, цинка, меди, натрия и иттербия в биотитах, видимо, являются поисковым признаком при разделении исследованных плутонов на рудные и безрудные.

После того как плутон выбран для детальных работ, можно использовать критерии, пере-

Таблица II

Критерии для выбора плутона по результатам анализа биотита

Элементы	Признаки
F	> 0,80% вдали от контактов
Zn	> 450 млн ⁻¹
Cu	> 50 млн ⁻¹
Na	< 0,70% Na ₂ O вдали от контактов
Y	< 100 млн ⁻¹ вдали от контактов
Li	Большинство проб > 0,130 Li ₂ O
V	Отдельные пробы > 3 млн ⁻¹ в пределах 45 м от руды
Bi	Отдельные пробы > 2 млн ⁻¹ в пределах 90 м от руды

Таблица III

Критерии для определения рудоносных контактов

Элементы	Возрастание или уменьшение по направлению к руде	Максимальное расстояние от руды до наблюдаемого изменения, м
Cu	+	7,5
Sc	++	120
Ag	+	15
Sr	++	30
Y	+	30
Cr	+	22,5
V	+	22,5
F	-	120
B	+	45
Bi	+	90
Na, Sr, Yb	Повышенные содержания Na, Sr, Yb в биотите из всех проб, взятых из поверхностных профилей вблизи рудного контакта	

численные в табл. III, для определения положения рудосодержащих контактов. Такие эле-

менты, как фтор, медь, серебро, скандий и иттрий, содержания которых в биотите обнаруживают существенные, отчетливо выраженные изменения вблизи руды, видимо, можно использовать как элементы-индикаторы. Кроме того, натрия, стронция и иттербия, содержания которых в биотите систематически различаются вблизи пустых и минерализованных контактов плутона, видимо, представляют другую группу возможных элементов-индикаторов для выявления потенциально рудоносных контактов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bateman P. C.*, Geology and Tungsten Mineralization of the Bishop District, California, U.S. Geol. Surv., Prof. Paper, 470, 1965.
2. *Darling R. G.*, The Distribution of Fluorine and Other Elements in Quartz Monzonite near Ore, Pine Creek Contact-Metasomatic Tungsten Deposits, Inyo County, California, Ph.D. dissertation, Stanford University, 1967.
3. *Gray R. F.*, et al., Bishop Tungsten District, California, in Ore Deposits of the United States, 1933—1967, Ridge J.D., ed., 2, AIME, 1968.

**РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ
В АКЦЕССОРНОМ МАГНЕТИТЕ ИЗ ИНТРУЗИВОВ
КВАРЦЕВЫХ МОНЦОНИТОВ И ЕГО СВЯЗЬ
С СУЛЬФИДНОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИЕЙ
В ПРОВИНЦИИ БАССЕЙНОВ И ХРЕБТОВ,
ШТАТЫ ЮТА И НЕВАДА
(ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЕ СООБЩЕНИЕ)**

Б. М. Хамиль
М. П. Наковски

Мичиганский технологический университет, Хотон, Мичиган
Университет Юта,
Солт-Лейк-Сити, Юта

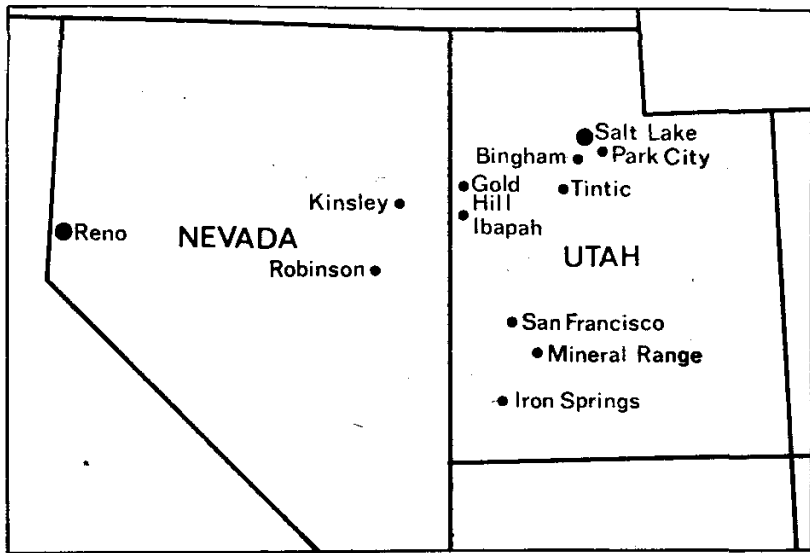
ВВЕДЕНИЕ

В провинции Бассейнов и Хребтов часто встречаются интрузивы монцонитов, содержащие магнетит в качестве акцессорного минерала; они обычно ассоциируют с рудопроявлениями цветных и благородных металлов, а также железа. Для использования акцессорного магнетита в качестве геохимического признака оруденения, генетически связанного с соответствующими породами, имеются серьезные геохимические и петрологические обоснования. Теобалд, Оверстрит и Томпсон [2] рассмотрели некоторые из этих обоснований.

В ходе исследования было опробовано десять районов, которые показаны на фиг. 1. К ним относятся:

1. Рудный район Тинтик, Юта.
2. Рудный район Бингем, Юта.
3. Рудный район Робинсон, Невада.
4. Район Парк-Сити — Литл-Коттонвуд, Юта.
5. Рудный район Айрон-Спрингс, Юта.
6. Шток Минерал-Рейндж, Юта.
7. Рудный район Сан-Франциско и прилегающие к нему районы, Юта.
8. Район Голд-Хилл, Юта.
9. Шток Ибапах, Юта.
10. Шток Кинсли, Невада.

Среди опробованных штоков имеются тела, с которыми ассоциируют известные рудные месторождения, и тела, с которыми не ассоциируют никакие рудные проявления. Ни один из штоков не подвергся воздействию процессов



ФИГ. 1. Обзорная карта, показывающая опробованные площади.

регионального метаморфизма, но некоторые из них, сопровождающиеся оруденением, претерпели значительное гидротермальное изменение. На основании имеющихся цифр абсолютного возраста и геологических данных обычно считается, что эти штоки внедрялись в раннетретичное время.

МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ПРОБ

Пробы взяты из 14 интрузивных тел в указанных десяти районах; с каждого опробованного обнажения бралось 1,6—3,2 кг свежей породы. Всего взято 103 пробы, из них проанализировано 88. Пробы из некоторых штоков, таких, как шток Бингем в рудном районе Бингем, не содержат магнетита, пригодного для анализа. Магнетит выделялся из породы путем дробления, размалывания и магнитной сепарации. Содержание минерала в магнетитовых концентратах определялось при помощи количественного дифрактометрического анализа. Микроскопическое изучение зерен в аншлифах служило проверкой минерального состава и точности дифрактометрического определения. Установлено, что магнетит содержит гематит в переменных, но небольших количествах, хотя в некоторых пробах его содержание возрастает до 30%. В двух пробах обнаружены следы лимонита, а в некоторых случаях установлено присутствие ильменита в количестве примерно 0,1% и нескольких зерен сульфидов. Содержание микроэлементов в магнетитовых концентратах определялось методом количественного рентгеноспектрального флюоресцентного анализа по синтетическим эталонам.

Первоначальное изучение при помощи рент-

геноспектрального анализа позволило обнаружить 16 микроэлементов, которые определялись количественно. К ним относятся Ti, V, Mn, Cr, Zn, Ni, Cu, Mo, Co, Ga, Ge, As, Se, In, Sn и Sb. Точность анализа, установленная статистически по эталонам, показывала предел для каждого элемента, ниже которого содержания элементов ненадежны в количественном отношении. Данные для отдельных штоков и районов были в некоторых случаях сильно изменчивы, и установление предела надежности по отдельным пробам привело бы к переоценке высоких содержаний при сопоставлении разных районов. Так, более низкий предел надежности получался при использовании среднегеометрических значений с уровнем значимости 80%. Этот предел надежности служит верхней границей для среднегеометрических величин содержаний микроэлементов для проб, попадающих по своим содержаниям между этим пределом и нулевым значением. В данной работе сравнивались только элементы, содержания которых в большинстве проб оказывались выше минимального предела надежности. Среди анализируемых элементов Ti, V, Mn, Cr и Zn были установлены в большинстве проб в количествах выше установленного предела надежности; Ni, Cu и Mo каждый в отдельности были установлены в количестве выше установленного предела надежности в двух пробах. Один или несколько других анализированных элементов обнаружено в большинстве проб в содержаниях меньше установленного количественного предела надежности.

Вследствие большого числа рассматриваемых параметров (типы районов, неэквивалентные количества отдельных анализов в каждом районе и предполагаемые различия в значений отдельных элементов как факторов корреляции) первоначальные предположения по сравниваемым районам не проводились. Для сравнения брались за основу только содержания микроэлементов и их вариации. Штоки и районы делились на группы в соответствии со среднегеометрическим содержанием и вариацией каждого микроэлемента. Группы сравнивались на основании анализа вариации в этих группах при помощи критерия F эквивалентности вариации. Затем группы модифицировались эмпирически, пока не были выделены три статистически значимые группы для каждого элемента при уровне значимости 90%. После того как были установлены особенности распределения каждого микроэлемента, для них затем определялась корреляционная связь с разными характерными чертами опробованных районов.

Опробованные районы характеризуются следующим образом:

Главные промышленные районы или штоки

Меднорудные — районы Бингем и Робинсон
Свинцово-цинковые — районы Тинтик, Бингем и Парк-Сити (шток Клейтон-Пик)
Железорудные — район Айрон-Спрингс

Районы или штоки со второстепенным оруденением

Меднорудные — район Сан-Франциско
Свинцово-цинковые — шток Литл-Коттонвуд (район Парк-Сити), шток Алта (район Парк-Сити), район Голд-Хилл, шток Ибапах

Штоки или районы без оруденения

Штоки Минерал-Рейндж, Кинсли и Ласт-Чанс (район Бингем)

Проявления интенсивного гидротермального изменения в опробованных штоках

Районы Тинтик и Робинсон

Характеристика относилась к продуктивности на цветные металлы, хотя многие рассматриваемые штоки и районы отличаются значительной продуктивностью на благородные металлы. Эта генетическая связь оруденения благородных металлов изучается в настоящее время.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Титан. Среднегеометрические содержания

Т а б л и ц а I

Статистически значимые группы средних содержаний титана в магнетите из штоков провинции Бассейнов и Хребтов

Нижний предел надежности для титана 210 млн⁻¹

Группа I 2500—5000 млн ⁻¹	Группа II 5000—10 000 млн ⁻¹
Шток Литл-Коттонвуд (Парк-Сити)	Шток } Алта (Парк-Сити) Шток Клейтон-Пик (Парк-Сити)
Район Робинсон	
Район Голд-Хилл	Район Айрон-Спринг
Шток Ибапах	Район Сан-Франциско
	Шток Минерал-Рейндж
	Шток Кинсли

Группа III
10 000—20 000 млн⁻¹

Район Тинтик
Шток Ласт-Чанс (Бингем)

титана распределяются по трем значимым группам, как показано в табл. I (группа I, 2500—5000 млн⁻¹; группа II, 5000—10 000 млн⁻¹; группа III, 10 000—20 000 млн⁻¹). Группа I включает главный меднорудный район Робинсон и три штока с второстепенным свинцово-цинковым оруденением. К группе III относится главный свинцово-цинковый промышленный район Тинтик и предположительно безрудный шток Ласт-Чанс в районе Бингем, который также

Т а б л и ц а II

Статистически значимые группы средних содержаний хрома в магнетите из штоков провинции Бассейнов и Хребтов

Нижний предел надежности для хрома 160 млн⁻¹

Группа I Менее 160 млн ⁻¹	Группа II Более 300 млн ⁻¹
Район Тинтик	Шток Алта (Парк-Сити) Шток Литл-Коттонвуд (Парк-Сити)
Район Робинсон	
Шток Минерал-Рейндж	Шток Клейтон-Пик (Парк-Сити)
	Шток Ласт-Чанс (Бингем)
	Район Айрон-Спрингс
	Район Сан-Франциско
	Район Голд-Хилл
	Шток Ибапах
	Шток Кинсли

Т а б л и ц а III

Статистически значимые группы средних содержаний цинка в магнетите из штоков провинции Бассейнов и Хребтов

Нижний предел надежности для цинка 97 млн⁻¹

Группа I менее 120 млн ⁻¹	Группа II 125—200 млн ⁻¹
Район Робинсон	Шток Алта (Парк-Сити) Шток Клейтон-Пик (Парк-Сити)
Район Сан-Франциско	
Район Айрон-Спрингс	Шток Литл-Коттонвуд (Парк-Сити)
Район Голд-Хилл	Шток Минерал-Рейндж
Шток Ибапах	
Шток Кинсли	

Группа III более 300 млн ⁻¹
Район Тинтик
Шток Ласт-Чанс (Бингем)

считается главным свинцово-цинковым промышленным районом. Группа II включает и свинцово-цинковые и меднорудные промышленные районы наряду с безрудными штоками, а также железорудный район. При этом генетическая связь, установленная в группах I и II, сохраняется. Шток Клейтон-Пик, являющийся продуктивным свинцово-цинковым штоком, содержит 9200 млн⁻¹ Ti. Еще несколько проб позволили бы отнести его к группе III. Район Сан-Франциско с второстепенным медным оруденением находится почти у нижнего предела группы II. Шток Ласт-Чанс безрудный и считался не связанным с оруденением в районе Бингем, который является главным промышленным свинцово-цинковым и меднорудным районом. Однако магнетит из этого штока содержит в среднем 19 400 млн⁻¹ Ti — наибольшее количество, обнаруженное в ходе выполнения исследования. Микроскопическое изучение показало отсутствие ильменита в этом магнетите. Гидротермально измененные породы не корре-

лируют с пониженным содержанием титана в районе Робинсон; все другие измененные интрузивы (Тинтик) характеризуются повышенным количеством титана в магнетите.

Хром. Содержания хрома распределяются по двум группам, как показано в табл. II (группа I: ниже предела надежности, равного 160 млн^{-1} ; группа II: $300\text{—}1300 \text{ млн}^{-1}$). Группа I включает районы Робинсон и Тинтик, а также шток Минерал-Рейндж. К группе II относятся все остальные штоки и районы, рассматриваемые в этой работе. Содержания хрома в группе II отличаются плотным распределением вариаций и их низкими значениями. Шток Клейтон-Пик находится у нижнего края, а район Айрон-Спрингс — у верхнего края пределов колебания количества хрома. Все штоки районов Тинтик и Робинсон, относящихся к группе I, гидротермально изменены. В штоке Минерал-Рейндж минерализация слабо изучена, а гидротермальные изменения отсутствуют. Тинтик представляет собой главный свинцово-цинковый промышленный район, а Робинсон — главный меднорудный район. Отсутствие конкретных данных по количеству хрома затрудняет интерпретацию образований группы I, но на основании имеющейся информации можно заключить, что содержание хрома в магнетите не является чувствительным индикатором для генетически связанного оруденения (группа II) и что эти содержания, установленные в группе II, представляют собой обычное распределение хрома в аксессуарном магнетите для опробованных пород. Гидротермальное изменение может вызвать уменьшение содержания хрома в магнетитах из районов Тинтик и Робинсон, поэтому они выпадают из ряда нормального распределения. Для штока Минерал-Рейндж никакое объяснение не предлагается.

Цинк. Средние содержания цинка в магнетите распределяются по трем значимым группам как показано в табл. III (группа I: менее 120 млн^{-1} ; группа II: $125\text{—}250 \text{ млн}^{-1}$; группа III: более 300 млн^{-1}). Большое содержание цинка в магнетите коррелируется с высокой продуктивностью на цинк, что отмечается для района Тинтик и штока Клейтон-Пик, который располагается в верхней части группы II (197 млн^{-1}). Установленная корреляция проявляется между высоким содержанием цинка в магнетите и оруденением в штоке Ласт-Чанс. Представляет интерес, что в этом случае отмечается повышенное содержание цинка в биотите из штока Ласт-Чанс, из штоков района Тинтик и штока Клейтон-Пик. Биотит же из штока Бингем и из штоков района Робинсон, продуктивных на медь, обеднен цинком по сравнению

с другими штоками кварцевых монзонитов в провинции Бассейнов и Хребтов [1]. Результаты этого исследования аналогичны выводам Теобальда и Томпсона [3], которые установили три уровня концентрации цинка в аксессуарном и аллювиальном магнетитах юго-восточной части США. Группа I: менее 100 млн^{-1} (пределы колебания среднего для этого уровня, по-видимому, определяют геохимический фон цинка в магнетите); группа II: $100\text{—}300 \text{ млн}^{-1}$ (эти пределы колебания характеризуют пробы, взятые на периферии рудоносных площадей или на площадях с бедным цинковым оруденением); группа III: выше 300 млн^{-1} (такие содержания ассоциируют с потенциальным промышленным цинковым оруденением).

Ванадий и марганец. Для них не отмечается сколько-нибудь значительное различие в распределении между разными штоками и районами. Ванадий (нижний предел надежности 125 млн^{-1}) попадает в одну группу с пределами колебаний содержания $1300\text{—}1500 \text{ млн}^{-1}$. Марганец (нижний предел надежности 74 млн^{-1}) попадает в одну группу с пределами колебания $400\text{—}2000 \text{ млн}^{-1}$. Эти значения, по-видимому, представляют пределы колебания нормальных количеств этих элементов в магнетитах из анализированных проб. Однако их распределение, напоминающее распределение титана, в магнетитах из главных промышленных свинцово-цинковых районов находится у верхнего края распределений, в магнетитах из меднорудных районов — близ значений средних содержаний для всех районов, в магнетитах из районов без оруденения и с второстепенным оруденением — у нижнего края распределения. Кажется вероятным, что высокие содержания марганца и ванадия в аксессуарных магнетитах коррелируют со свинцово-цинковым оруденением, ассоциирующим с кварцевыми монзонитами в провинции Бассейнов и Хребтов. Данные по другим элементам, обнаруженным в ходе выполнения этого исследования, в настоящее время недостаточны, чтобы сделать выводы об их значении.

ВЫВОДЫ

Результаты этой работы можно суммировать следующим образом.

1. Каждый шток или район характеризуется своим специфическим набором микроэлементов в аксессуарных магнетитах. Особенности количественного распределения микроэлементов в магнетитах каждого района различны.
2. Обычно аксессуарные магнетиты из главных промышленных свинцово-цинковых райо-

нов отличаются высокими содержаниями микроэлементов. Магнетиты из главных меднорудных районов характеризуются содержаниями микроэлементов, близкими к средним содержаниям по пробам всех районов.

3. Содержание меди в акцессорном магнетите из гидротермально измененных штоков, по видимому, пониженное. Медь — единственный элемент, подверженный этим изменениям.

4. Большие количества титана и цинка в магнетите коррелируют с промышленным свинцово-цинковым оруденением, ассоциирующим с материнскими интрузивами кварцевых монзонитов.

5. Предположительно безрудный шток Ласт-Чанс в районе Бингем характеризуется содержаниями микроэлементов в магнетите, аналогичными содержаниям в штоках, с которыми непосредственно ассоциирует свинцово-цинковое оруденение.

6. Содержания микроэлементов в акцессорном магнетите коррелируют с сульфидным оруденением цветных металлов (и железа), ассоциирующим с интрузивами материнских кварцевых монзонитов в провинции Бассейнов и Хребтов в штатах Юта и Невада.

7. Для уточнения указанных зависимостей необходимо провести дополнительные исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Parry W. T., Nackowski M. P., Copper, Lead and Zinc in Biotites from Basin and Range Quartz Monzonites, *Econ. Geology*, 58, № 7, 1126—1144, 1963.
2. Theobald P. K., Overstreet W. C., Thompson C. E., Minor Elements in Alluvial Magnetite from the Inner Piedmont Belt, North and South Carolina, U.S. Geol. Survey, Prof. Paper, 554-A, 1967.
3. Theobald P. K., Thompson C. E., Zinc in Magnetite from Alluvium and from Igneous Rocks Associated with Ore Deposits, U.S. Geol. Survey, Prof. Paper 450-C, C72—C73, 1962.

ДИФРАКТОМЕТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ИЗМЕНЕНИЯ СИЛИКАТОВ КАЛИЯ ПРИ ОБРАЗОВАНИИ ПОРФИРОВЫХ РУД

Д. М. Хаузен

«Ньюмонт-эксplorейшн»,
Данбери, штат Коннектикут

П. Ф. Керр

Колумбийский университет,
Нью-Йорк, штат Нью-Йорк

ВВЕДЕНИЕ

Благоприятные для наиболее перспективных рудопроявлений площади могут быть установлены при помощи изучения изменений пород, что позволяет сузить площади под бурение и снизить тем самым общие расходы на разведку. Количественная оценка изменения пород находит все более широкое применение как метод поисков, дополняющий и геофизические и геохимические методы, предшествующие бурению.

Зоны измененных пород расположены, как правило, концентрически и окружают гидротермальные рудные тела разных типов. Такие зоны изменчивы по форме, размерам и минеральному составу, но повторяют рисунок распределения оруденения в виде геометрического ореола. Это в общем справедливо для гипогенных месторождений с вкрапленными медно-молибденовыми рудами. Предпринята попытка применить оконтуривание мономинеральных зон при изучении изменения вмещающих пород для поисков и разведки порфирикового оруденения. Корреляция ореолов околорудных изме-

нений с геохимическими аномалиями нескольких медно-молибденовых (порфириковых) рудопроявлений показала возможность применения оконтуривания ореолов изменения как действенной методики при поисках и разведке.

Выражаем признательность «Юнион-карбид-корпорейшн» и «Ньюмонт-майнинг-корпорейшн» за разрешение опубликовать данные по использованию изменений вмещающих пород при поисках некоторых рудопроявлений. Коммерческая информация специально исключена, основное внимание уделено методике сбора и интерпретации данных.

ОБЩИЙ ФОН ПОРФИРОВОГО ОРУДЕНЕНИЯ

В этой статье не делается попытки определить зоны изменения как метаморфические фации или стадии гидротермального изменения, а скорее они рассматриваются как ассоциации зон, которые могут быть легко измерены для количественного сравнения. Трудность интерпретации геометрии измененных пород в медно-

порфировых рудопроявлениях привела к многочисленным попыткам классификации минеральных ассоциаций этих измененных пород как метаморфических фаций [2, 3, 1], стадий [6], метасоматических изменений [4, 5], зон или оболочек [11, 10].

Одна из проблем при трактовке минеральных ассоциаций гидротермально измененных пород как метаморфических фаций заключается в наличии метастабильных или реликтовых фаз в результате неполного протекания равновесных реакций. Геометрические термины «зона» или «оболочка» применяются как более предпочтительные по сравнению с временными терминами, такими, как «стадия», главным образом потому, что парагенетическая интерпретация изменений пород неопределенна и варьирует от одного порфирового рудопроявления к другому. Поэтому в данной статье применяется классификация по зонам, что позволяет характеризовать ассоциации измененных пород в различных участках минерализованного пространства.

Зональность в порфировых месторождениях чаще всего бывает перекрывающей и широкой в относительном смысле, что может потребовать детального картирования и лабораторного исследования проб, взятых по сети. Выделяются четыре главных типа минеральных ассоциаций измененных пород в порядке возрастания степени изменения: 1) пропилитовая, 2) переходная аргиллитовая, 3) серицитовая и 4) ассоциация калиевых силикатов (т. е. вторичных биотита и калиевого полевого шпата). Часто могут быть установлены заметные этапы изменения биотита: сначала он переходит в хлорит, затем в аргиллитовую смесь, далее в серицит и, наконец, происходит вынос серицита и образование пустот. Биотит крупнозернистый, и изменение, установленное в лаборатории, может быть замечено в последующем и в поле при помощи лупы. Таким образом, изверженная горная порода, содержащая биотит, может быть легко определена и изучена, а зоны изменения закартированы. Более десятка лет назад этот критерий успешно применяли Сейлс и Мейер [12], Ловеринг [9], Керр [7, 8] и др.

Однако сильно минерализованные участки встречаются в тех местах, где имеется несколько типов пород, причем не все они содержат биотит. В подобных случаях используются другие критерии. В участках с оруденением почти всегда имеются полевые шпаты; они подвержены изменениям, а следовательно, и процессы, протекающие в ходе изменения микроклина, ортоклаза и плагиоклаза, служат существенными критериями для установления зон изменения.

Последние, установленные однажды, также могут указывать на особенности размещения измененных пород, зависящие от трендов оруденения. Кроме того, разложение железо-магнетизальных силикатов, серицитизация и окварцевание помогают расшифровать тенденции изменения.

При всех исследованиях такого рода необходимо учитывать два существенных момента: 1) полевые критерии должны базироваться на прочном фундаменте лабораторных исследований; 2) критерии должны быть такими, чтобы их легко можно было заметить в поле после того, как они установлены экспериментально. Второе положение особенно важно, чтобы легко устанавливалась геометрия зон изменения.

ОПРОБОВАНИЕ И АНАЛИЗ МИНЕРАЛЬНЫХ АССОЦИАЦИЙ ИЗМЕНЕННЫХ ПОРОД

Характер распределения гипогенного изменения устанавливается при помощи дифрактометрического анализа некоторых вторичных минералов в сочетании с опробованием по сети поверхностных обнажений или керна буровых скважин.

Количественное изучение изменения пород может проводиться при наличии десятка или двух десятков проб, но надежность результатов повышается с увеличением количества проб до сотни или более. Опробование по сети рекомендуется проводить на участках, где имеются поверхностные обнажения. Однако случайные сколковые пробы из отдельных обнажений, мелких шурфов, подземных горных выработок и буровых скважин позволяют провести рекогносцировку участка на предмет предварительного исследования изменения пород. Интервалы опробования могут превышать первые сотни метров, но их следует уменьшать в участках, где на обнажениях можно провести бороздовое опробование по сети.

Для получения дифрактограмм в настоящем исследовании использовался транзисторный дифрактометр Norelco с широкоугольным гониометром, монохроматором из изогнутого кристалла и транзисторным самописцем Nonuwell. Материал проб истирался до фракции 0,01 мм и снимался в интервале значений 2θ от 2 до 31° со скоростью 2 град/мин на $\text{Cu}_{K\alpha}$ -излучении. Непрерывная съемка образцов производилась при напряжении 40 кВ, силе тока 20 мА, чувствительности 500 имп/с.

Особая предосторожность соблюдалась при подготовке поверхности образцов, которые были относительно воспроизводимы для рентгенов-

ского анализа. Превращенный в пудру материал проб тщательно запрессовывался вручную в стандартные алюминиевые держатели. Измерялась интенсивность пиков межплоскостного расстояния (110) 4,47 Å для серицита, соответствующего модификации 2M₁ мусковита, а относительные величины сравнивались для оценки степени серицитизации.

Была предпринята попытка привлечь ряд других методов для оценки развития калиевых полевых шпатов в месторождениях порфирирового типа. Наиболее чувствительная методика состоит в установлении величины отношения интенсивности межплоскостного расстояния (040) 3,24 Å для калиевого полевого шпата к соответствующей интенсивности межплоскостного расстояния 3,18 Å для плагиоклаза, выраженной в виде частного от деления этих величин. Такая процедура существенно уменьшает ошибку, возникающую от предпочтительной ориентировки. Величины отношений калиевый полевой шпат/плагиоклаз могут колебаться в пределах от 0,8 до 1,2 для пород типа кварцевых монзонитов, возрастать для гранитов и убывать для пород гранодиоритового и диоритового состава. Это отношение также возрастает по мере увеличения интенсивности процессов калишпатизации и может приближаться к бесконечно большим значениям для случаев, когда плагиоклаз в основном замещен калиевыми полевыми шпатами.

Степень окварцевания, калишпатизации и серицитизации измерялась полуколичественно при помощи дифрактометрического анализа на кварц, калиевый полевой шпат и серицит в измененной породе. Весовые проценты содержания оценивались путем измерения интенсивностей пиков характеристичных отражений и сравнения их с эталонными кривыми. Серицит, калиевый полевой шпат и кварц — наиболее удобные минералы для измерения и диагностики в измененных породах в месторождениях порфирирового типа; они успешно использовались при разведке и оценке.

Процентные содержания минералов или их соотношения в пробах, взятых по сети, наносились на карту и проводились изолинии. Таким образом устанавливались средние значения для оценки интенсивности гидротермального изменения, а также трендов изменения на локальных рудопроявлениях или обширных площадях.

ПРИМЕНЕНИЕ «КОЛИЧЕСТВЕННОГО ИЗМЕНЕНИЯ» ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ПОИСКОВ И РАЗВЕДКИ

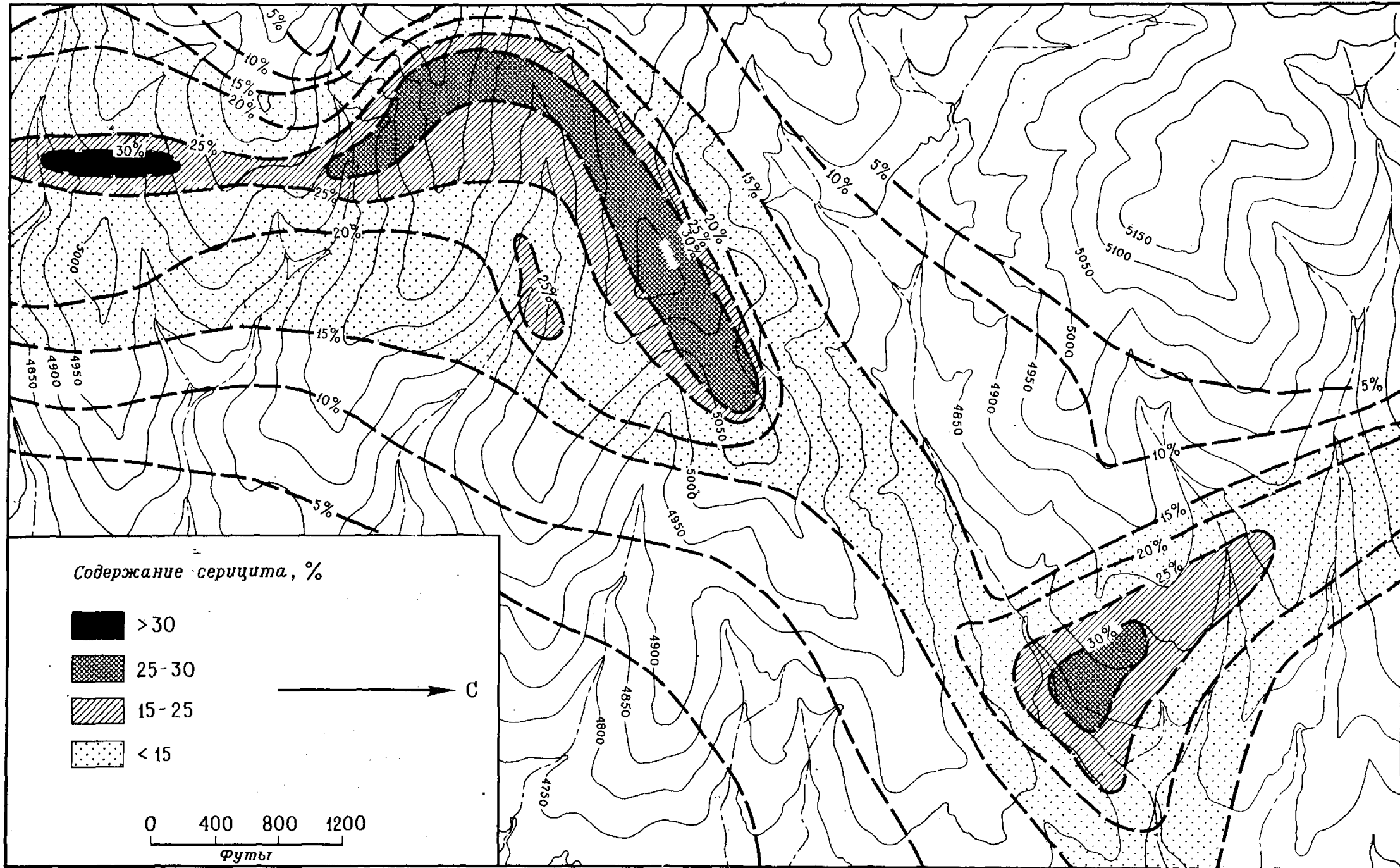
Дифрактометрический анализ минералов измененных пород нашел особое применение при

оконтурировании; центральных участков измененных пород при помощи минералогического картирования. Даже в том случае, если значения в лучшем случае полуколичественные, зависимость между степенью изменения и оруденением становится очевидной после беглого сравнения изменения и экспериментальных данных. Простое нанесение на геологическую карту замеров изменений пород может быть достаточным для выявления трендов оруденения и направления поисков наиболее вероятных зон оруденения. Ниже кратко описывается несколько примеров, показывающих, как использованы измененные породы в целях поисков и разведки. Во многих случаях соответствующая информация, включая содержания в некоторых пробах и данные по запасам, а также их точное местоположение, не приводятся по экономическим соображениям. В соответствии с этим основной упор делается на методику и интерпретацию данных.

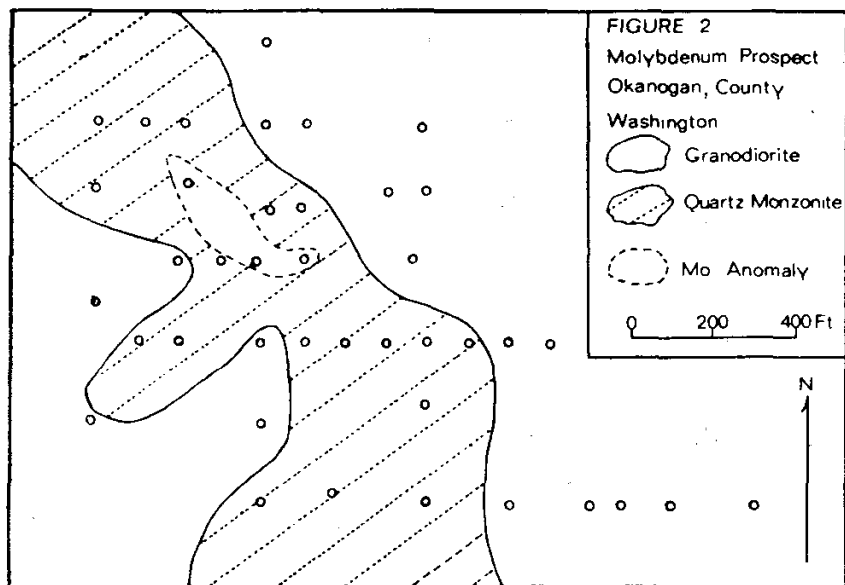
Серицитизация, ассоциирующая с медно-молибденовым оруденением. Применение анализа на серицит к исследованию трендов изменения пород при поисках в районе Кингмен, штат Аризона, показано на фиг. 1. Оценка процентного содержания серицита в ряде проб из обнажений интрузий гранодиоритов наносилась на карту и проводились изолинии, чтобы выявить относительно узкие тренды изменения пород, простирающиеся в северном направлении через участок с рудопроявлением. Вдоль этого тренда перемежаются литогеохимические аномалии меди и молибдена.

Серицитизация, по-видимому, подчиняется структурному контролю и пространственно ассоциирует с главными зонами нарушений в пределах интрузий. Зоны максимального изменения, как видно, располагаются в местах пересечений структурных нарушений, где было также установлено большинство значительных литогеохимических аномалий.

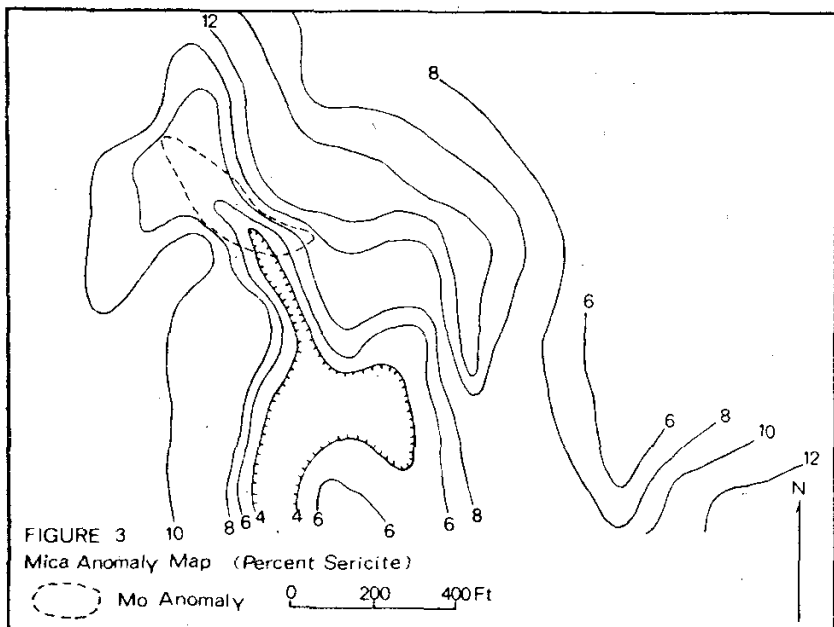
Калишпатизация и окварцевание, ассоциирующие с молибденовым оруденением в округе Оканоган, штат Вашингтон. Сеть опробования гранодиоритового штока в округе Оканоган, штат Вашингтон, показана на фиг. 2. Калишпатизация и окварцевание привели к образованию оруденелых пород, соответствующих по составу кварцевому монзониту, вдоль северо-западного тренда по интрузии. Первичный биотит гранодиорита превращается в тонкозернистый агрегат серицита и хлорита в пределах оруденелого кварцевого монзонита, в результате понижается общее содержание слюд, что выявляется при помощи рентгеновского анализа. Таким образом, возникает довольно



ФИГ. 1. Карта аномального развития серицитизации (содержание серицита, %), Кингмен, Аризона.



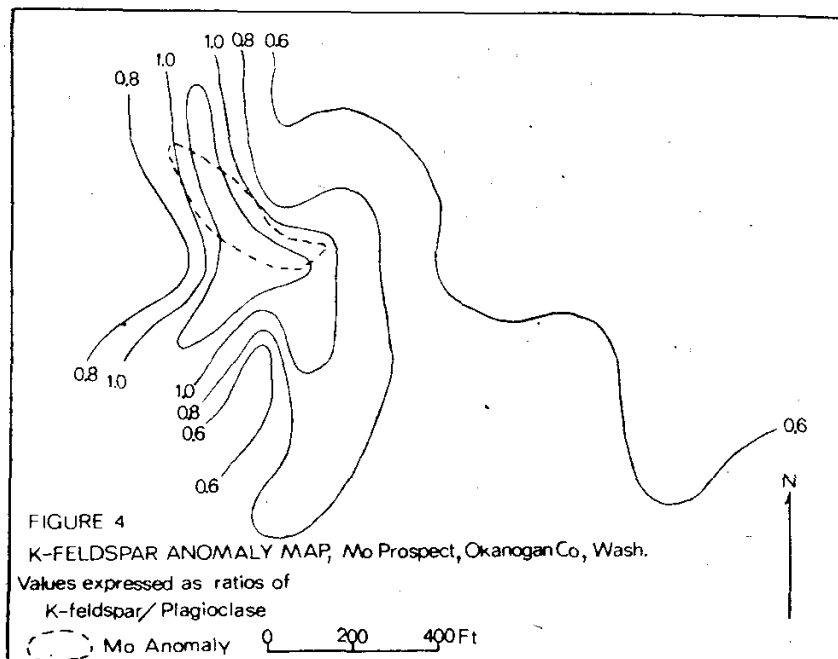
ФИГ. 2. Молибденовое рудопроявление, округ Оканоган, Вашингтон.



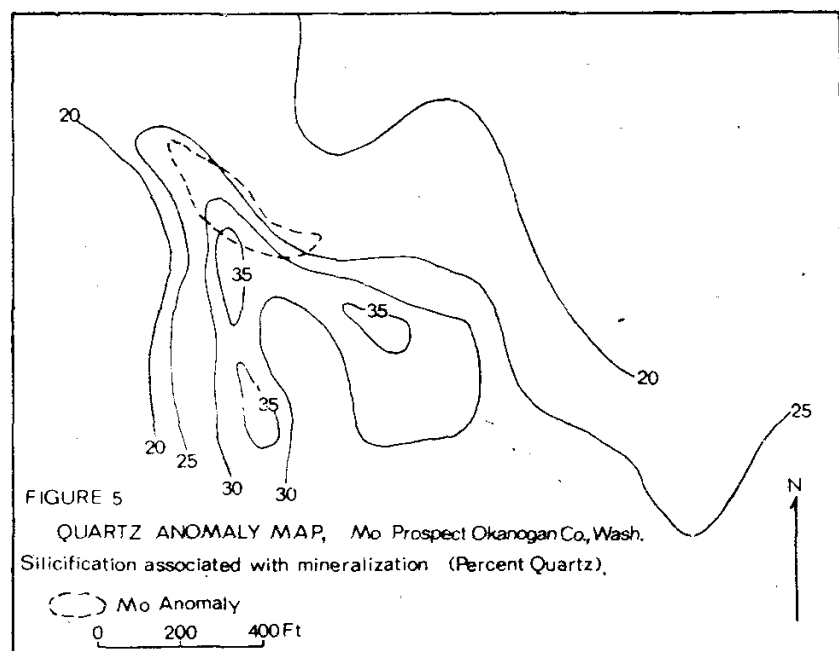
ФИГ. 3. Карта аномального развития слюды (содержание серицита, %).

необычная аномалия «низких содержаний слюд» на фоне высоких содержаний молибдена, что и показано на фиг. 3.

Содержания как вторичного кварца, так и вторичного калиевого полевого шпата возрастают в пределах аномалии молибдена, а в результате получается оболочка измененных пород, простирающихся на юго-восток от молибденового рудопроявления. Векторные соотношения между измененными породами и молибденовым оруденением показаны на фиг. 4 и 5. Развитие калиевого полевого шпата, выраженное в виде величины отношения калиевый полевой шпат/плагиоклаз, нанесено на фиг. 4; оно распределяется в форме вытянутой зоны в кварцевых монзонитах, длинная ось которой проходит с северо-запада на юго-восток. Аномалия молибдена, выявленная на основе изучения

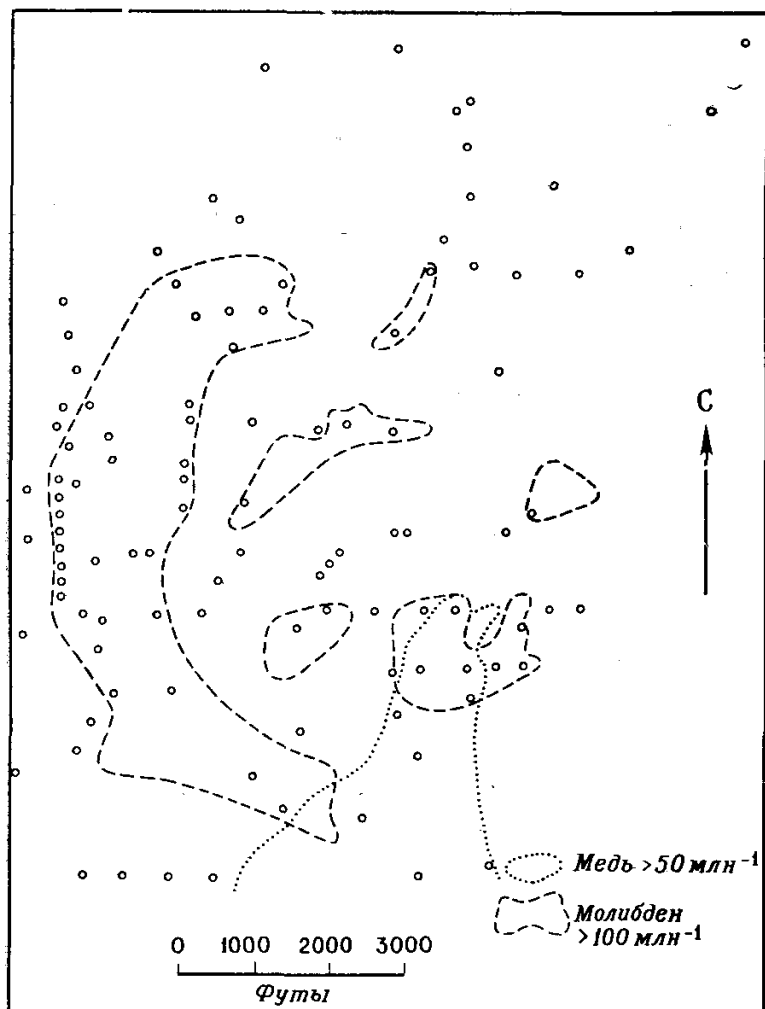


ФИГ. 4. Карта аномального развития калиевого полевого шпата, молибденовое рудопроявление, округ Оканоган, Вашингтон (величины отношений калиевый полевой шпат/плагиоклаз).



ФИГ. 5. Карта аномального развития кварца, молибденовое рудопроявление, округ Оканоган, Вашингтон; окварцевание, ассоциирующее с оруденением (содержание кварца, %).

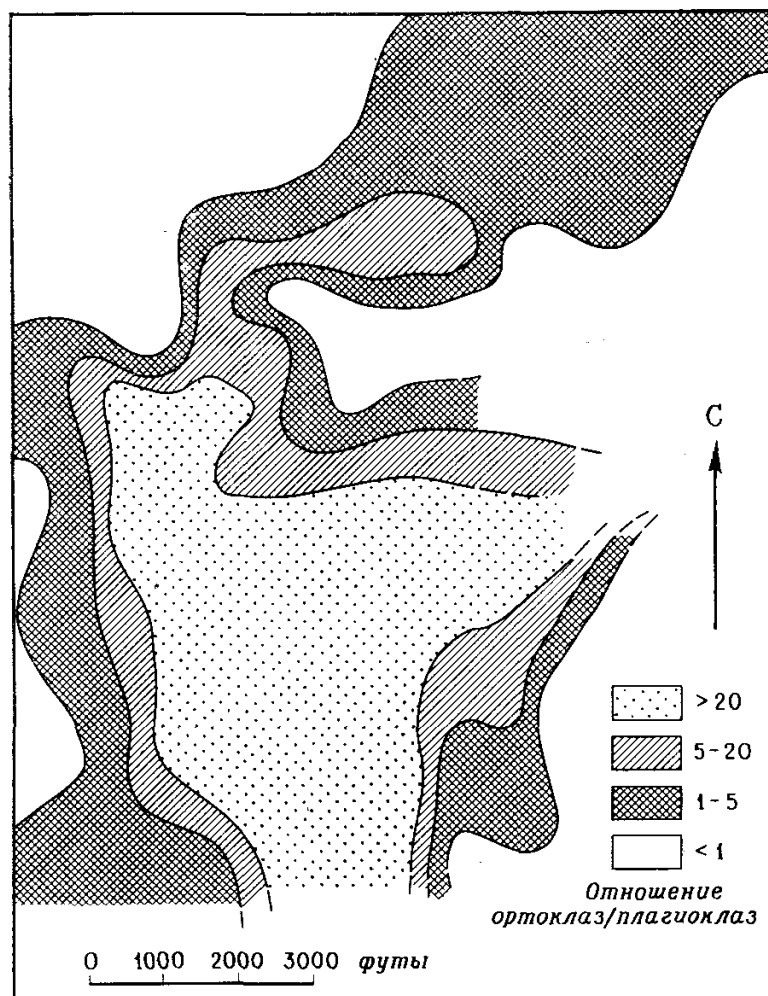
геохимии вмещающих пород, также представляет собой вытянутую зону, но меньших размеров, ориентированную в том же направлении. Содержания кварца, нанесенные на график (фиг. 5), характеризуют ореол измененных пород с расплывчатым расширением на юго-восток и таким образом дают векторную расшифровку направления погружения оруденения в интрузиве. Такой тип информации не выдается при простом геохимическом изучении и требует комбинированного исследования вмещающих пород, т. е. их геохимии и процессов изменения.



ФИГ. 6. Аномалии молибдена и меди на рудопроявлении в округе Джефферсон, Монтана.

Концентрическая пневматолитовая зональность, ассоциирующая с медно-молибденовым оруденением в батолите Боулдер, округ Джефферсон, штат Монтана выявляется в результате опробования обнажений по сети в пределах медно-молибденового рудопроявления в округе Джефферсон, Монтана. Типы пород характеризуются общей систематической зональностью в отношении структуры и состава от гранитного ядра через концентрические внешние оболочки кварцевого монцонита и гранодиорита. Пневматолитовое изменение широко распространено и местами проявлено интенсивно; это приводит к образованию концентрической структуры, обусловленной позднемагматическими постепенными изменениями состава пород.

Молибденовое оруденение локализуется вдоль западного края центрального ядра кварц-ортоклазовых пород (фиг. 6), где величина отношения ортоклаз/плагиоклаз колеблется в пределах от 20 до 1. Интенсивность калишпатизации зонально убывает по мере перехода от центрального ядра во внешние части. Исключения составляют южный и восточный участки,



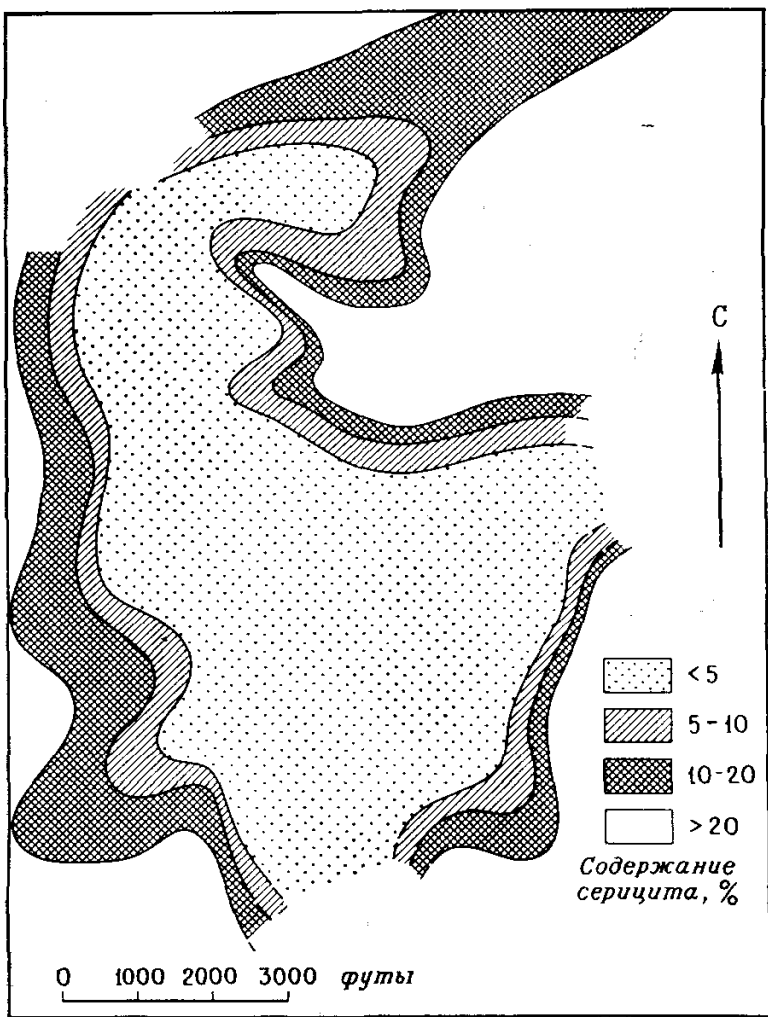
ФИГ. 7. Калишпатизация на молибденовом рудопроявлении, округ Джефферсон, Монтана (величины отношений [ортоклаз/плагиоклаз]).

которые остаются не полностью оконтуренными (фиг. 7).

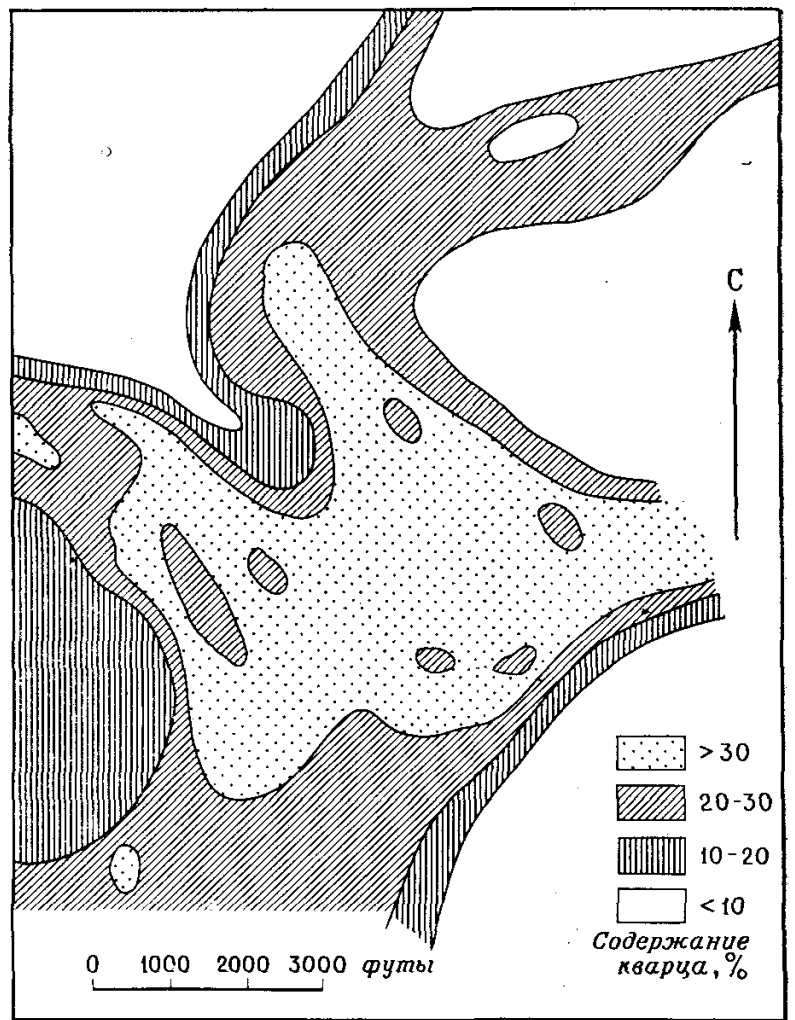
Аналогичная картина установлена в развитии при серицитизации (фиг. 8), характеризующейся постепенным нарастанием интенсивности при переходе от центрального ортоклазового ядра во внешние зоны. Вблизи геохимической аномалии молибдена серицитизация развита сравнительно слабо. Аномально слабое развитие серицитизации отмечается также к югу и востоку от центрального ядра.

Процентное содержание кварца нанесено на график (фиг. 9), который показывает, что зона высокого содержания кварца перекрывает ядро, обогащенное ортоклазом. Аномалия окварцевания обнаружена в восточном направлении и аналогична другим аномалиям изменения пород.

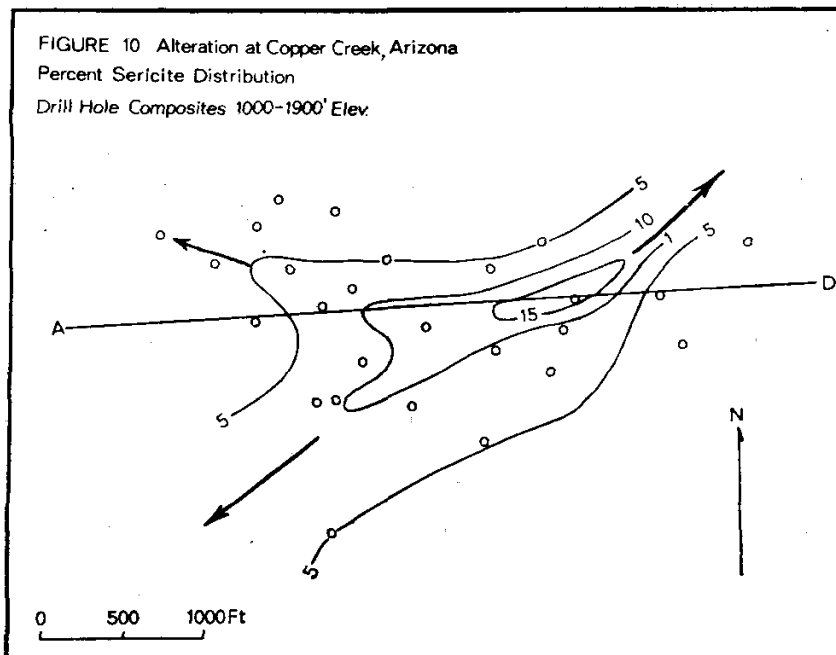
Изменение, ассоциирующее с медным оруденением, в керне буровых скважин из Коппер-Крик, штат Аризона. Пробы керна буровых скважин из Коппер-Крик, близ Магма, штат Аризона, исследовались на изменения, а результаты сопоставлялись с данными по содержанию меди. Пробы керна из 21 буровой



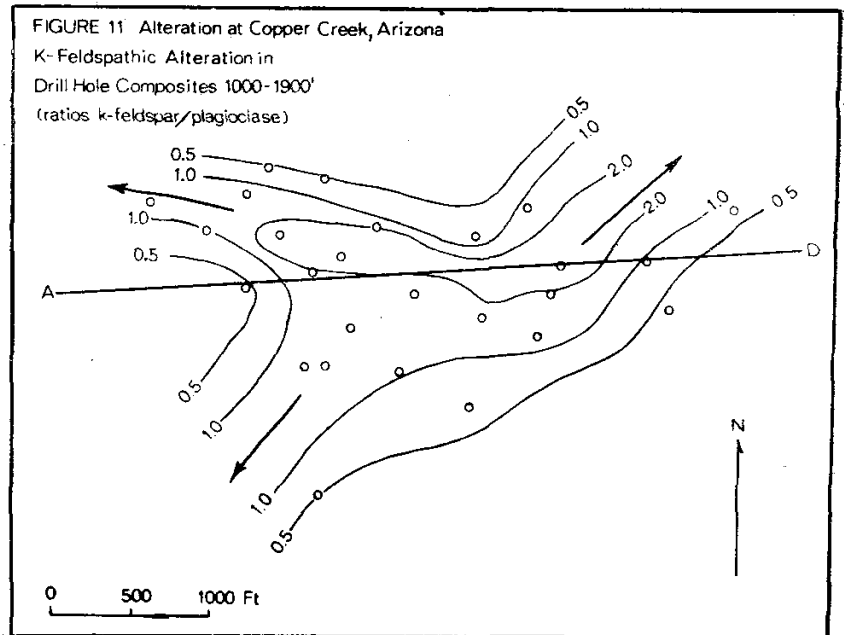
ФИГ. 8. Серичитизация на молибденовом рудопроявлении, округ Джефферсон, Монтана (содержание серицита, %).



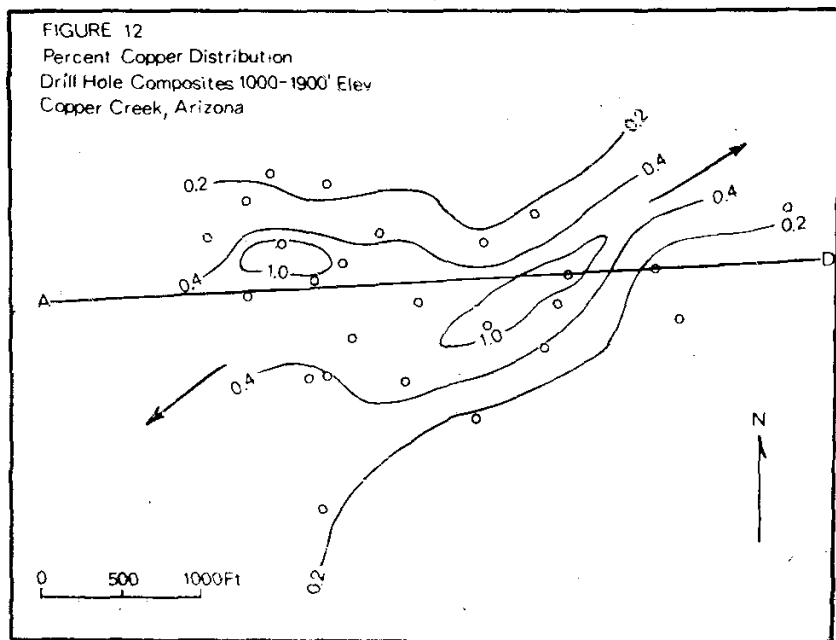
ФИГ. 9. Окварцевание на молибденовом рудопроявлении, округ Джефферсон, Монтана (содержание кварца, %).



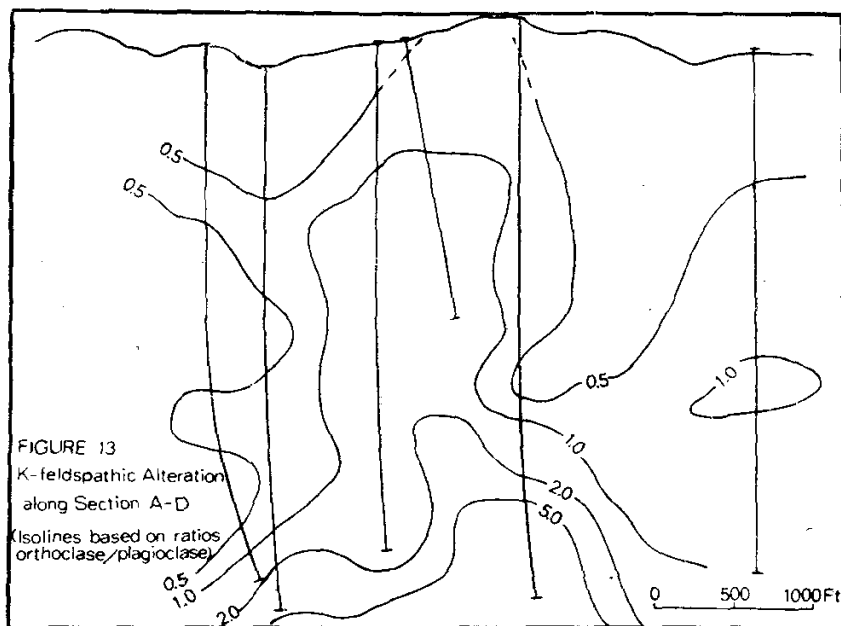
ФИГ. 10. Изменения на рудопроявлении Коппер-Крик, Аризона; распределение серицита (содержание, %) по данным анализа проб из буровых скважин; горизонты 1000—1900 футов.



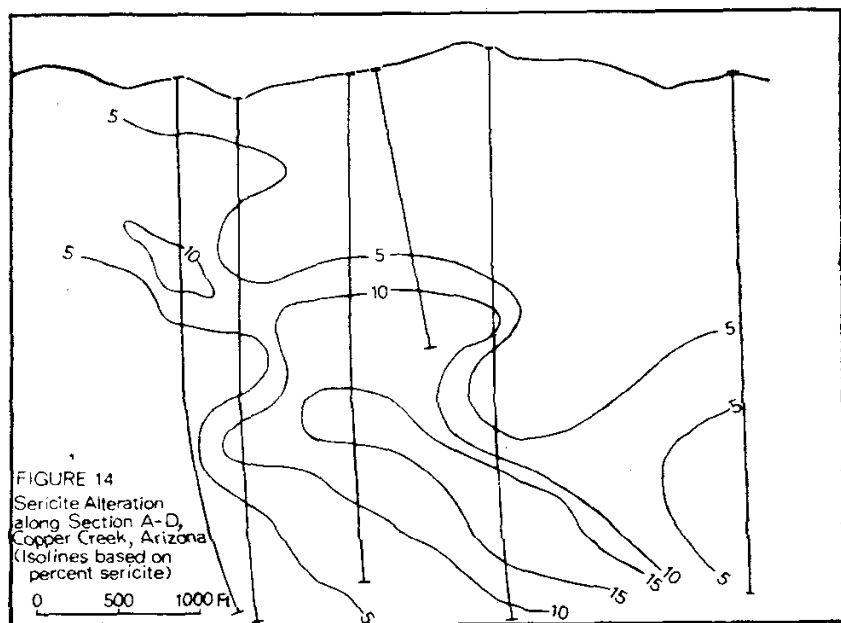
ФИГ. 11. Изменения на рудопроявлении Коппер-Крик, Аризона; калишпатизация по данным анализа проб из буровых скважин (величины отношений калиевый полевой шпат/плагиоклаз); горизонты 1000—1900 футов.



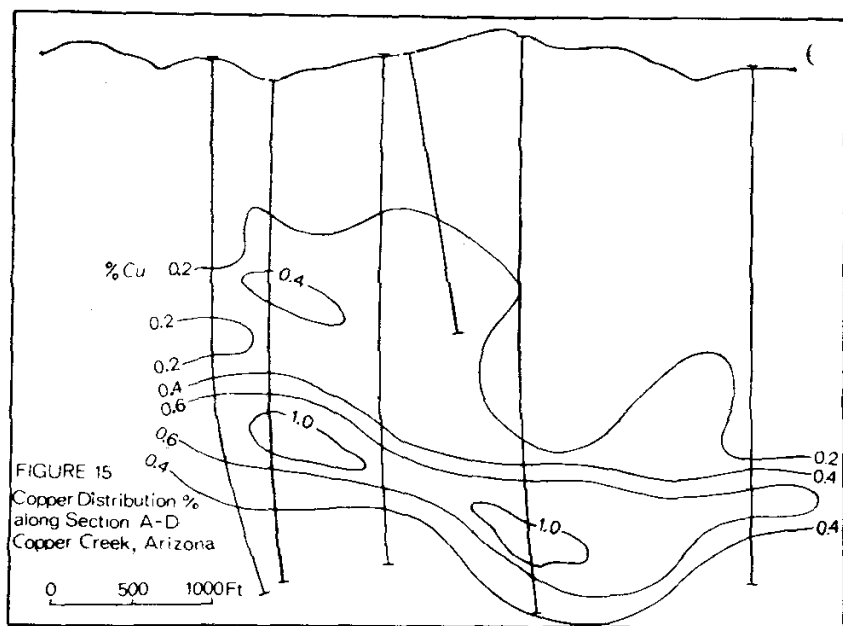
ФИГ. 12. Распределение меди (содержание, %) на рудопроявлении Коппер-Крик, Аризона по данным анализа проб из буровых скважин; горизонты 1000—1900 футов.



ФИГ. 13. Калишпатизация по разрезу А — D на рудопроявлении Коппер-Крик, Аризона (изолинии построены по величинам отношений ортоклаз/плагиоклаз).



ФИГ. 14. Серичитизация по разрезу А — D на рудопроявлении Коппер-Крик, Аризона (изолинии построены по содержаниям серицита, %).



ФИГ. 15. Распределение меди (содержание, %) по разрезу А — D на рудопроявлении Коппер-Крик, Аризона.

скважины объединялись для каждого стофуттового интервала на горизонтах от 1000 до 1900 футов. Параметры изменения пород наносились на поверхности, представляющие десять различных горизонтов, и проводились изолинии.

На графиках состава выявляются главные тренды изменения пород, имеющие направленные восток — запад, для серичитизации (фиг. 10) и калишпатизации (фиг. 11). Графики изменения пород коррелируются с графиками распределения меди (фиг. 12), так же как на поверхности коррелируются структуры и изменения пород.

Тренды изменения пород и геохимия вмещающих пород показывают два, а возможно, три перспективных «открытых» (неоконтуренных) фланга для последующих изысканий. Совпадение трендов изменения пород на разных горизонтах предполагает наличие структурного контроля по вертикали.

Разрез по линии А — D дает вертикальный профиль серичитизации (фиг. 14) и медного оруденения (фиг. 15) сходного распределения и ориентировки.

Для калишпатизации характерно постепенное увеличение интенсивности с глубиной

с глубиной (фиг. 13), что установлено на многих медно-порфировых месторождениях.

Таким образом, глубинные тренды изменения пород выявляются при помощи дифрактометрического анализа бурового шлама, при этом они коррелируются с особенностями распределения меди.

ВЫВОДЫ

В работе показано, что минералогическое картирование способствует установлению корреляционных связей между аномалиями изменения пород и геохимическими аномалиями и что «полуколичественные» определения серицита, калиевого полевого шпата и кварца могут успешно применяться при геохимических исследованиях рудопроявлений порфирового типа. Зоны изменения встречаются в виде изолированных пятен или концентрических ореолов вокруг центральных ядер пород, измененных пневматолитовыми процессами. В структурном отношении они часто взаимосвязаны с образованием вытянутых трендов вдоль разломов или зон дробления, и вероятность обнаружения руды в их пределах больше, чем вне трендов.

Распределение измененных пород вокруг рудного тела иногда заметно меняется от одного участка к другому, а также в зависимости от типа пород. Значительные вариации могут появляться в различных рудных участках, которые формировались на разных стадиях рудного процесса, от мезотермальной до гипотермальной (пневматолитовой). Максимальные концентрации металлов иногда встречаются в минеральных ассоциациях, связанных или с серитизацией, или калишпатизацией, или изредка с аргиллизацией. Принимая во внимание все эти причины, необходимо применять индивидуальный подход при изучении каждого рудопроявления при одновременном тесном контакте между лабораторным персоналом и геологами-полевиками.

ЗАВИСИМОСТЬ СОДЕРЖАНИЯ ОЛОВА В ГРАНИТНЫХ ПОРОДАХ ОТ ИХ ХИМИЧЕСКОГО И МИНЕРАЛЬНОГО СОСТАВА

ВВЕДЕНИЕ

Одной из главных задач геологии является установление полезных для поисковых целей генетических связей между рудными месторож-

Векторные соотношения между изменением пород и оруденением становятся заметными после нанесения на схему данных по изменению пород и содержанию металлов в пробах, взятых по сети, с последующим построением изолиний.

Интерпретация характера распределения измененных пород позволяет уточнить направление развития оруденения и предполагаемые запасы вдоль трендов, которые иначе могут остаться неустановленными.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Burnham C. W.*, Facies and Types of Hydrothermal Alteration, *Econ. Geol.*, 57, 768—784, 1962.
2. *Creasey S. C.*, Some Phase Relations in the Hydrothermally Altered Rock of Porphyry Copper Deposits, *Econ. Geol.*, 54, 351—373, 1959.
3. *Creasey S. C.*, Hydrothermal Alteration, in *Geology of the Porphyry Copper Deposits*, Titley S.R., Hicks C. L., ed., Tucson, Univ. of Arizona Press, 51—74, 1966.
4. *Gupta S. P. Das, Gupta P. R. S., Murphy M. V. N.*, Nature and Significance of Wall Rock Alterations in Some Hydrothermal Ore Deposits in India, *Econ. Geol.*, 60, 1702—1708, 1965.
5. *Hemley J. J., Jones W. R.*, Chemical Aspects of Hydrothermal Alteration with Emphasis on Hydrogen Metasomatism, *Econ. Geol.*, 59, 538—569, 1964.
6. *Kents P.*, Hydrothermal Developments in the Andes, *Econ. Geol.*, 58, 1110—1118, 1963.
7. *Kerr P. F.*, Alteration Features at Silver Bell, Arizona, *Geol. Soc. America Bull.*, 62, 451—480, 1951.
8. *Kerr P. F., Kulp J. L., Patterson C. M., Wright R. J.*, Hydrothermal Alteration at Santa Rita, New Mexico, *Geol. Soc. America Bull.*, 61, 275—347, 1950.
9. *Lovering T. S.*, Rock Alteration as a Guide to Ore — East Tintic District, Utah, *Econ. Geol.*, 36, 229—279, 1949.
10. *Lowell J. D.*, Geology of the Kalamazoo Orebody, San Manuel District, Arizona, *Econ. Geol.*, 63, 645—654, 1968.
11. *Meyer C., Hemley J. J.*, Wall Rock Alteration, in *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*, Barnes H. L., ed., Holt, Rinehart and Winston, Inc., 1967.
12. *Sales R. H., Meyer C.*, Wall Rock Alteration at Butte, Montana, *Am. Inst. Min. Engr. Trans.*, 178, 9—35, 1948.

В. Р. Хесп

КСИРО,

Отделение минеральной химии,
Четсвуд, Новый Южный Уэльс,
Австралия

дениями и окружающими породами. В отношении минералов олова, которые добываются в течение тысячелетий [46], было опубликовано много статей. Библиографическая сводка Хесса и Хесс [23] содержит 1700 ссылок, касающихся

олова. Детальные описания оловоносных районов мира были сделаны Риджем [39], Алфелдом [1] и совсем недавно Шулингом [42]. Однако количественные соотношения между химическим и минеральным составом горных пород и содержанием в них олова до сих пор не установлены.

В большинстве месторождений олово связано с кислыми гранитами; до начала образования касситерита важную роль в концентрировании олова в этих породах играют, вероятно, биотит, мусковит и роговая обманка. Акцессорные минералы сфен, рутил и гранат также могут быть концентраторами олова, но в связи с очень малым количеством этих минералов в породах их общий вклад в баланс олова менее важен, чем вклад биотита.

Некоторыми исследователями [3, 27, 37] уже указывалось на корреляцию между содержаниями олова в биотитах и гранитных породах, однако количественной оценки этой корреляции сделано не было. С другой стороны, Хоскинг [24, 25] и Чаурси [14] выражали сомнения по поводу универсальности такой связи.

Основные аспекты концентрирования олова в гранитоидах и в биотитах из этих пород обсуждались некоторыми авторами [5, 15], но в подтверждение выявленных корреляционных связей приводился ограниченный фактический материал.

Имеющиеся данные по гранитным породам Австралии [38] помогают объяснить механизм накопления олова в биотитах. В настоящей статье дается статистическая оценка корреляционных связей, полученных по этим данным. Исследовалась также зависимость между химическим и минеральным составом пород и содержанием в них олова.

СОСТАВ ГРАНИТНЫХ ПОРОД АВСТРАЛИИ И БИОТИТОВ ИЗ НИХ

Распределение содержаний SiO_2 в 170 пробах гранитоидов, главным образом гранитов, адаметеллитов и гранодиоритов, проанализированных Раттиганом [38], показано на фиг. 1. Здесь же приведены содержания SiO_2 в 473 пробах гранитов Австралии, описанных Джоплином [28]. Сходство (бимодальность и слабая отрицательная асимметричность) кривых распределения, полученных для обеих этих групп, означает, что изученные породы могут в целом рассматриваться в качестве типичных представителей гранитоидных пород. Отрицательная асимметрия находится в соответствии с наблюдениями Аренса [2], а бимодальное распределение довольно близко к распределению, описанному

Штейнбергом и Ферштаттером [43] для гипабиссальных гранитов.

Пределы колебаний, средние арифметические значения и их стандартные отклонения для содержаний SiO_2 в породах, проанализированных Раттиганом, составляют соответственно 58,2—79,2, 71,6 и 4,2% (см. фиг. 1); для второй группы соответствующие значения равны 65,0—79,8, 71,9 и 3,4%. Как показано на фиг. 1, модальные значения SiO_2 для первой группы равны 71,5 и 76,0%, а для второй — 71,5 и 74,5%. Графики накопленных частот для содержаний SiO_2 на обычной вероятностной бумаге, представленные на фиг. 1, а и 1, б, наводят на мысль о том, что асимметричное распределение, возможно, обусловлено смешением трех или четырех групп с нормальным распределением.

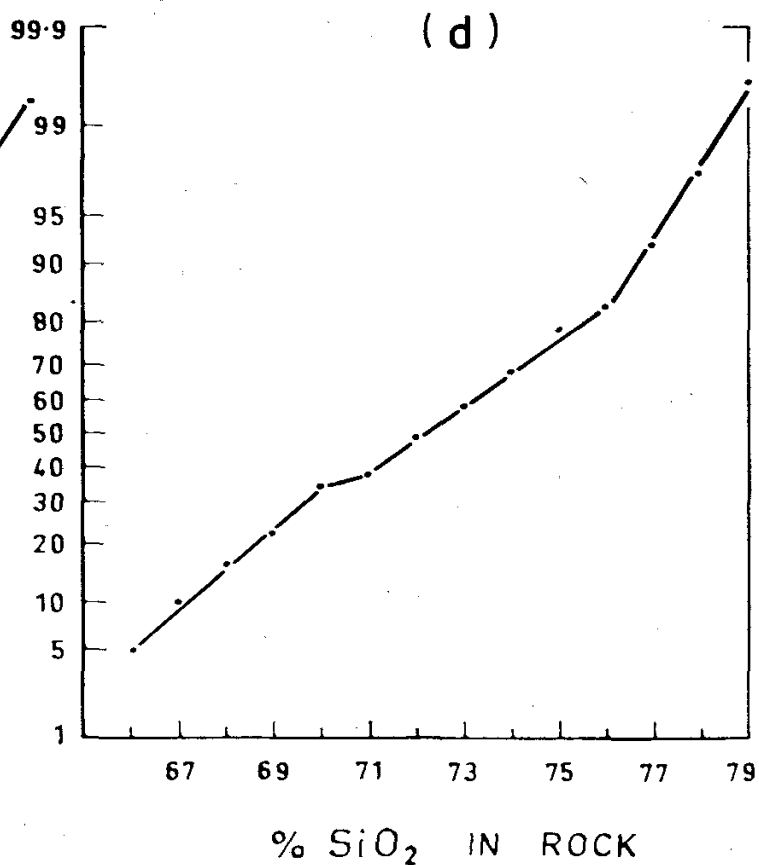
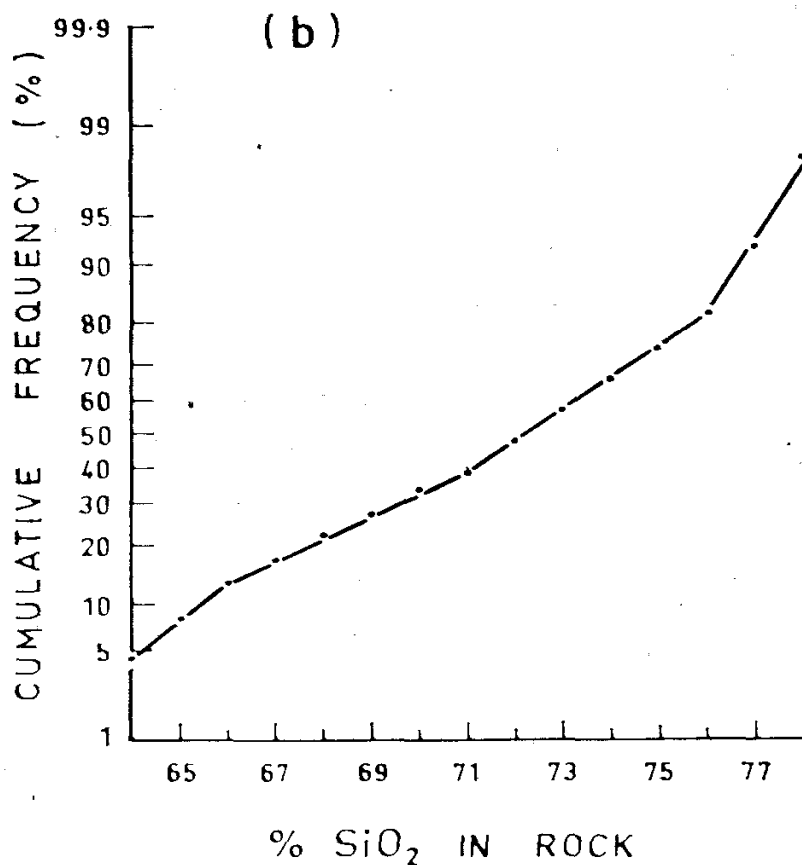
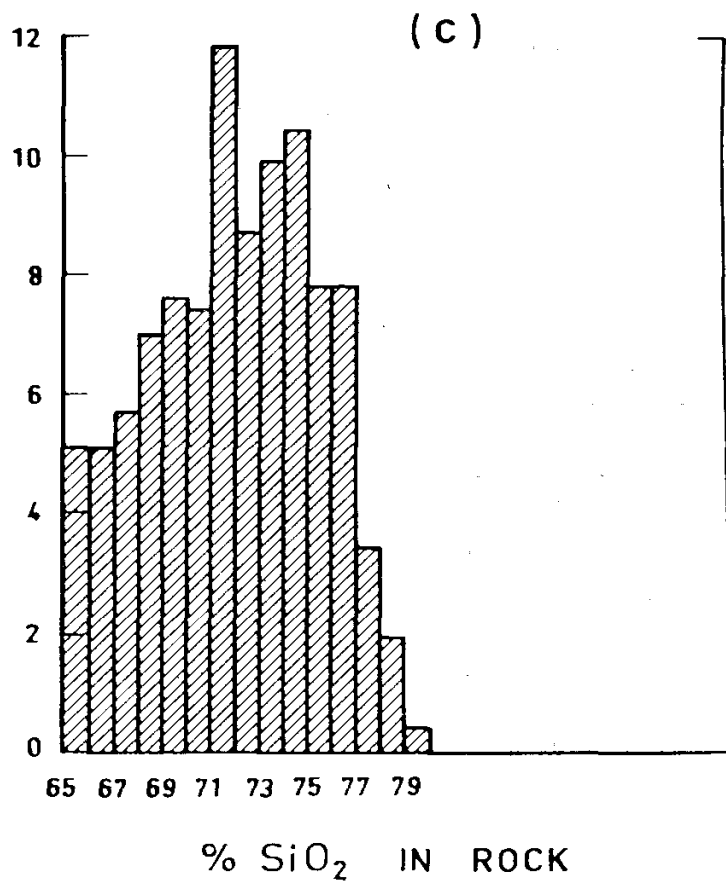
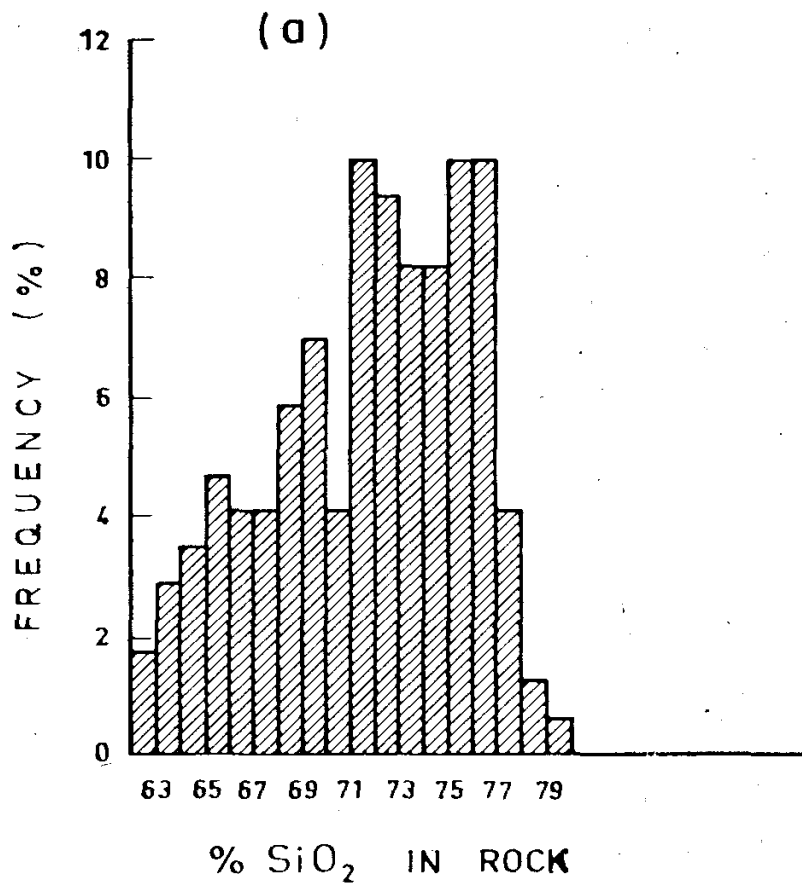
Модальное содержание биотитов варьирует в широких пределах (0—27%): до 10% в гранитах, 20% в адаметеллитах и 27% в гранодиоритах. Как показано на фиг. 2, наблюдается ясно выраженная обратная зависимость между количеством биотита и содержанием SiO_2 в породах. Значения, приведенные Доджем с соавторами [17] для калифорнийских гранитов и Л. В. Дмитриевым и др. [16], а также Н. Е. Залашковой и А. А. Ситниным [48] для гранитов Каибского массива и восточного Забайкалья, в целом соответствуют данным, которые получены для гранитных пород Австралии.

Был определен [38] химический состав 21 пробы биотитов из гранитов, проанализированных на олово, и рассчитаны кристаллохимические формулы этих биотитов в пересчете на 24 (O, OH, F). Точки, характеризующие отношения между катионами в октаэдрических позициях, находятся на треугольной диаграмме внутри границ, установленных для биотитов Фостер [20]. Биотиты из гранитов с высоким содержанием олова относятся в большинстве случаев к железистому типу и не отличаются существенно от биотитов из обычных гранитов или кислых адаметеллитов. Характерной чертой всех исследованных биотитов является относительно низкое содержание магния.

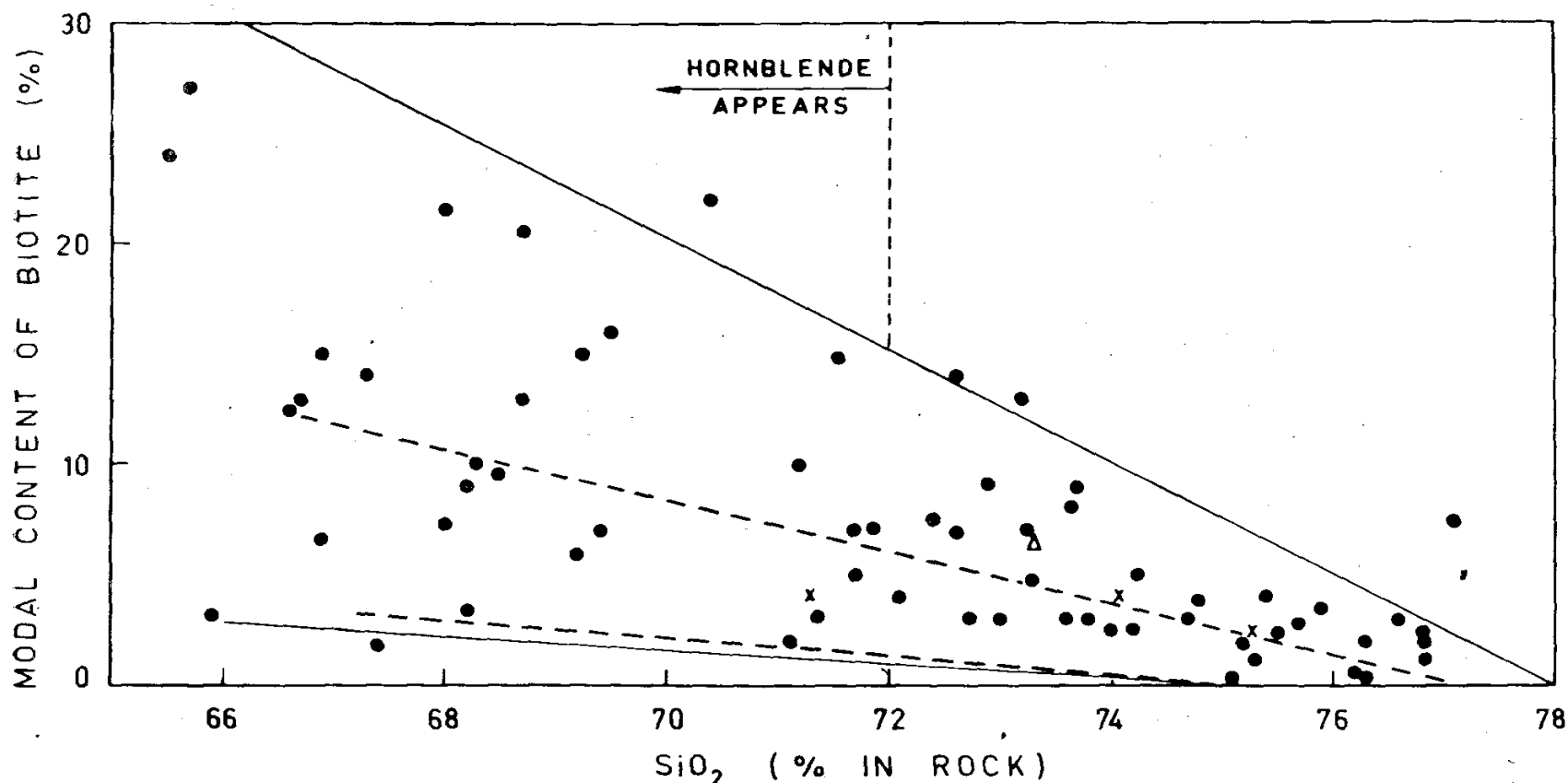
ПАРАМЕТРЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОЛОВА¹

Кривая частот распределения олова в исследованных породах характеризуется сильной

¹ Для определения содержания олова в породах Раттиган [38] использовал спектрографический метод, разработанный Геологической службой США [9] и колориметрический метод, предложенный Вудом [47]. Нижний предел определения олова составлял 5 млн^{-1} спектрографическим методом и $0,5 \text{ млн}^{-1}$ колориметрическим методом. Достоверность колориметрических определений $[(\sigma/x) \times 100]$ составляла 15%.



ФИГ. 1. Распределение содержаний SiO₂ в гранитоидах Австралии.
a и *b* — 170 проб гранитоидов [38]; *c* и *d* — 473 пробы гранитоидов [28].



ФИГ. 2. Содержание биотита в гранитоидах.

Таблица I

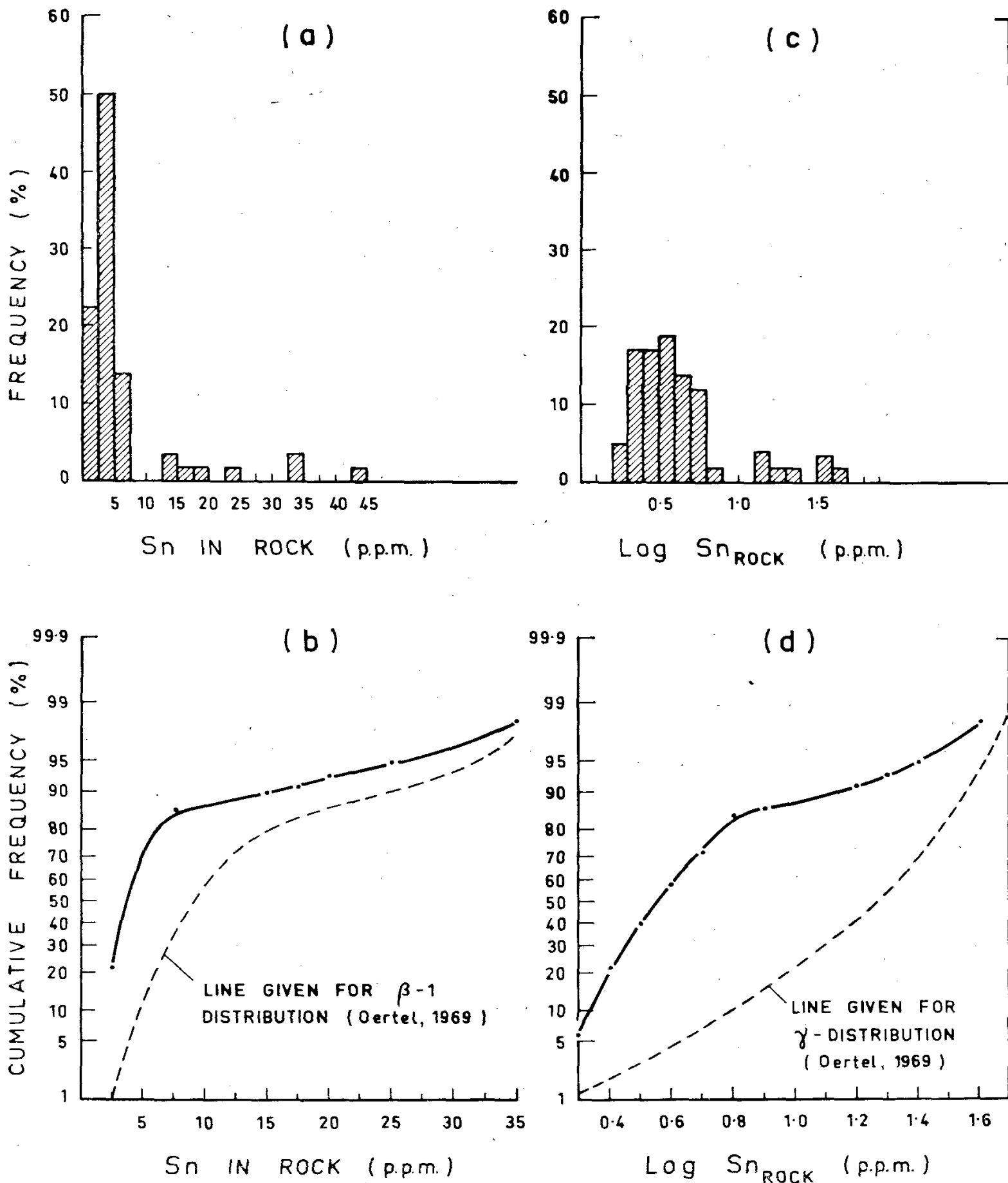
Характеристика гранитных пород Австралии и биотита из этих пород (рассчитано по данным Раттигана [38])

	Число проб	SiO ₂ , %				Число проб	Sn, млн ⁻¹			
		Пределы колебаний	Среднее арифметическое	Стандартное отклонение	Коэффициент вариации		Пределы колебаний	Среднее арифметическое	Стандартное отклонение	Коэффициент вариации
1. Породы										
а. Богатые оловом гранитоиды (Sn _п > 5 млн ⁻¹)	17	72,1—76,9	75,4	1,7	0,02	15	5—45	16	13	0,8
б. Бедные оловом гранитоиды (Sn _п < 5 млн ⁻¹)	153	58,2—71,2	71,2	4,2	0,06	43	2—5	3,5	0,8	0,2
в. Все породы	170	58,2—79,2	71,6	4,2	0,06	58	2—45	7	9	1,3
2. Биотиты										
а. Из богатых оловом гранитоидов	10	35,9—38,1	37,0	0,8	0,02	13	8—315	107	108	1,0
б. Из бедных оловом гранитоидов	23	34,2—39,0	36,5	1,3	0,04	38	6—15	9	2	0,3
в. Из всех пород	33	34,2—39,0	36,7	1,1	0,03	51	6—315	34	68	2,0

положительной асимметрией (фиг. 3, а); в логарифмической шкале (фиг. 3, с) положительная асимметрия становится слабее. Диаграммы накопленных частот в пропорциональной (фиг. 3, б) и логарифмической (фиг. 3, д) шкалах показывают, что описанное распределение олова в породах не соответствует точно ни логнормальному закону, ни гамма-распределению, но кривая на фиг. 3, б довольно близка по форме

к кривой, установленной Оэртелем [33] для распределения типа бета-1.

На фиг. 4 приведены частоты распределения логарифмов содержаний олова в биотитах для всех проанализированных пород (фиг. 4, а и 4, б) и для гранитов с высоким содержанием олова (фиг. 4, с и 4, д). В обеих группах распределение логарифмов содержаний оказалось положительно асимметричным, что указывает

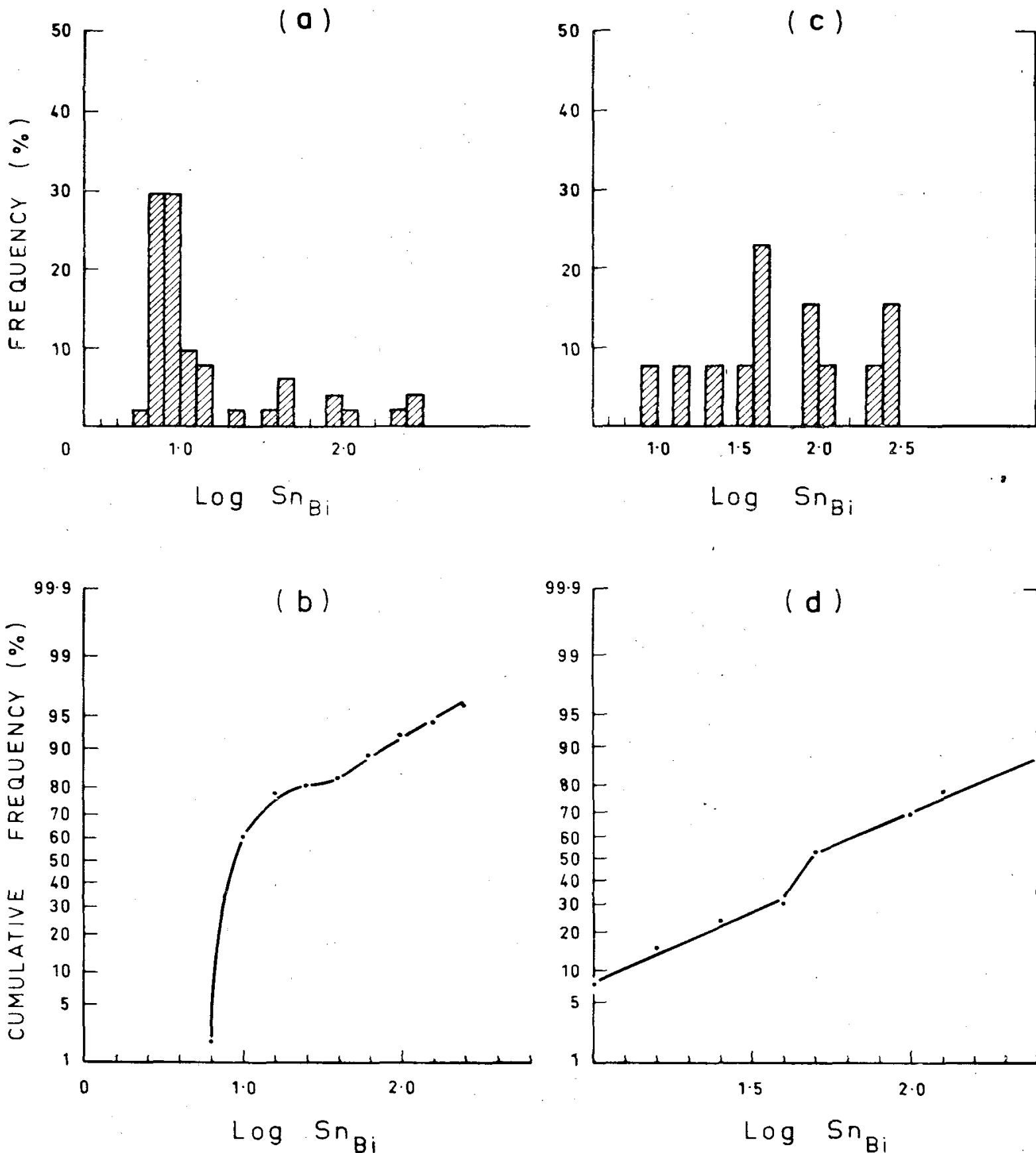


ФИГ. 3. Распределение содержаний олова и их логарифмов в гранитоидах Австралии (58 проб). *a* и *b* — содержание олова; *c* и *d* — логарифмы содержаний олова; пунктирные линии— β -1 и γ -распределения [33].

на несоответствие распределения содержаний логнормальному закону.

В табл. I приведены пределы колебаний, средние арифметические значения и стандартные отклонения для концентраций олова в раз-

личных группах пород и в биотитах. Из этой таблицы видно, что пределы колебаний олова довольно широки как в породах (2 млн^{-1} — 45 млн^{-1}), так и в биотитах (6 млн^{-1} — 315 млн^{-1}). Среднее содержание олова в оловоносных гра-



ФИГ. 4. Распределение олова в биотитах.

a и *b* — все породы (51 проба); *c* и *d* — оловоносные ($\text{Sn}_{\text{II}} > 5$ млн⁻⁴) граниты (13 проб).

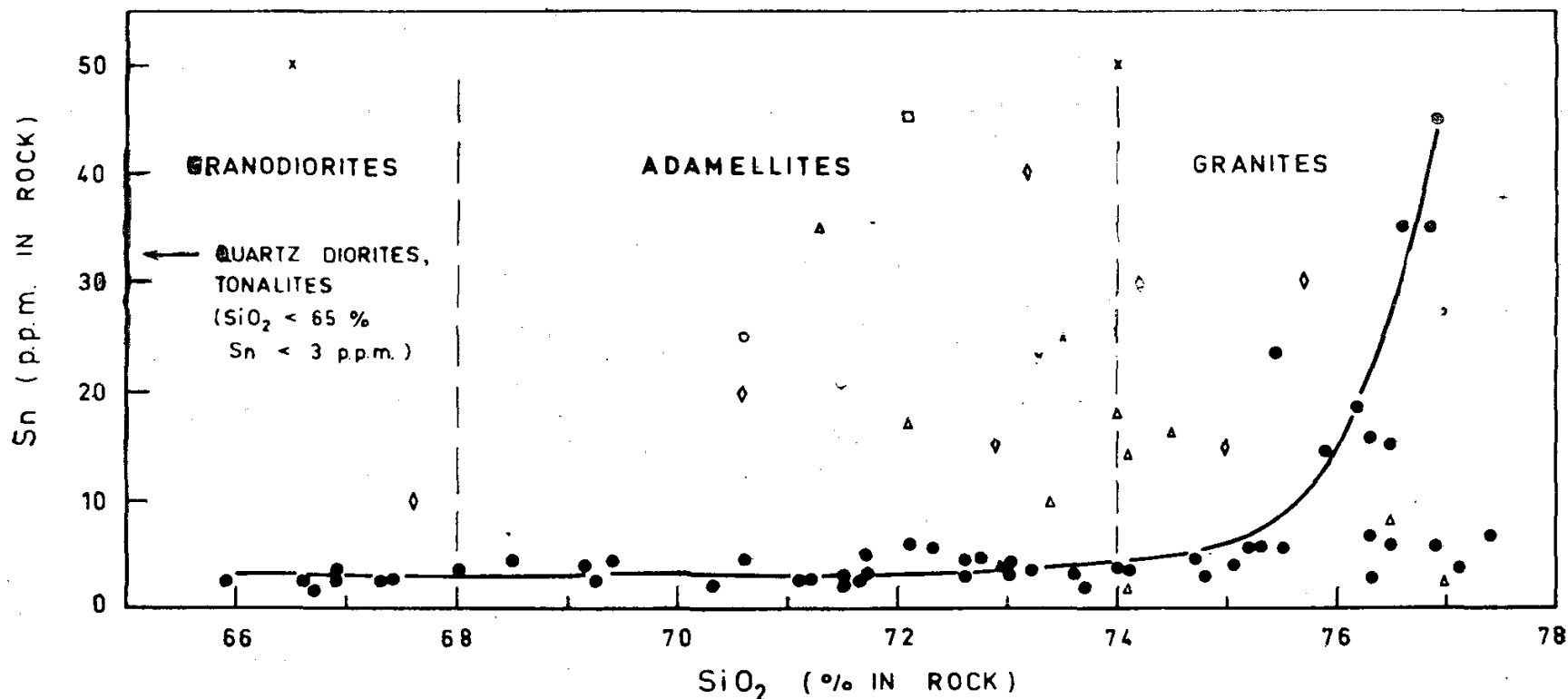
нитях выше в 5 раз, а в биотитах из этих пород — в 12 раз, чем в неоловоносных гранитах и биотитах из них.

СВЯЗЬ МЕЖДУ СОДЕРЖАНИЕМ ОЛОВА И СОСТАВОМ ПОРОД

Геологические аспекты происхождения и распределения олова в различных типах пород,

обсуждавшиеся Раттиганом [38], составляют предмет другой статьи [19]. В настоящей статье рассматривается лишь связь концентраций олова с химическим и минеральным составом пород.

Связь минералов с биотитовыми гранитами повышенной кислотности признается исследователями, но количественные соотношения между содержаниями олова и кремнезема в породах



ФИГ. 5. Зависимость между содержаниями олова и кремнезема в гранитоидах.

не установлены. На фиг. 5 показана такая зависимость для исследованных гранитоидов Австралии, а для сравнения приведены данные по содержанию олова в породах других районов мира. Из фиг. 5 видно, что в породах Австралии, содержащих менее 75% SiO₂, концентрация олова обычно составляет менее 5 млн⁻¹. При содержаниях SiO₂ в пределах 75—77% имеются породы с высокими концентрациями олова (до 45 млн⁻¹), но, с другой стороны, встречается почти столько же проб с низкими концентрациями этого элемента. Согласно данным Раттигана [38], аномальные случаи можно объяснить, основываясь на том, что концентрация олова должна быть прямо пропорциональной размерам конкретных батолитов, но количественная оценка этой связи в работе отсутствует.

Положение на фиг. 5 точек, характеризующих гранитные породы Кукульбейского комплекса [10], а также из Колорадо и Техаса [22], Корнуэлла [13, 24] и западной Малайзии [18], является дополнительным подтверждением того, что четкая зависимость между содержаниями олова и кремнезема в породах отсутствует. Некоторые адамеллиты, содержащие 71—74% SiO₂, характеризуются высокими концентрациями олова, а в некоторых гранитах повышенной кислотности (77% SiO₂) содержа-

ние олова низкое (<5 млн⁻¹). Боливийские оловянные месторождения в гранодиоритах и кварцевых диоритах [41] также представляют исключение из правила.

В СССР были установлены две характерные ветви оловоносных пород [6]. В некоторых сериях содержание олова уменьшается в направлении гранит → гранодиорит → диорит, как это наблюдается в Калбинском массиве; в других же сериях содержание олова сначала возрастает с увеличением основности в ряду гранит → кварцевый диорит → габбро-диорит, а затем снижается, как это установлено в районах Мяо-Чана и Джиды.

Табл. II представляет собой корреляционную матрицу, построенную для олова и окислов всех петрогенных элементов гранитов. Коэффициенты корреляции в основном низкие (<0,5). Так как Ca, Mg и Fe имеют обратно пропорциональную связь с SiO₂, олово обнаруживает отрицательную корреляцию с этими элементами; величины коэффициентов корреляции примерно такие же, как и с SiO₂.

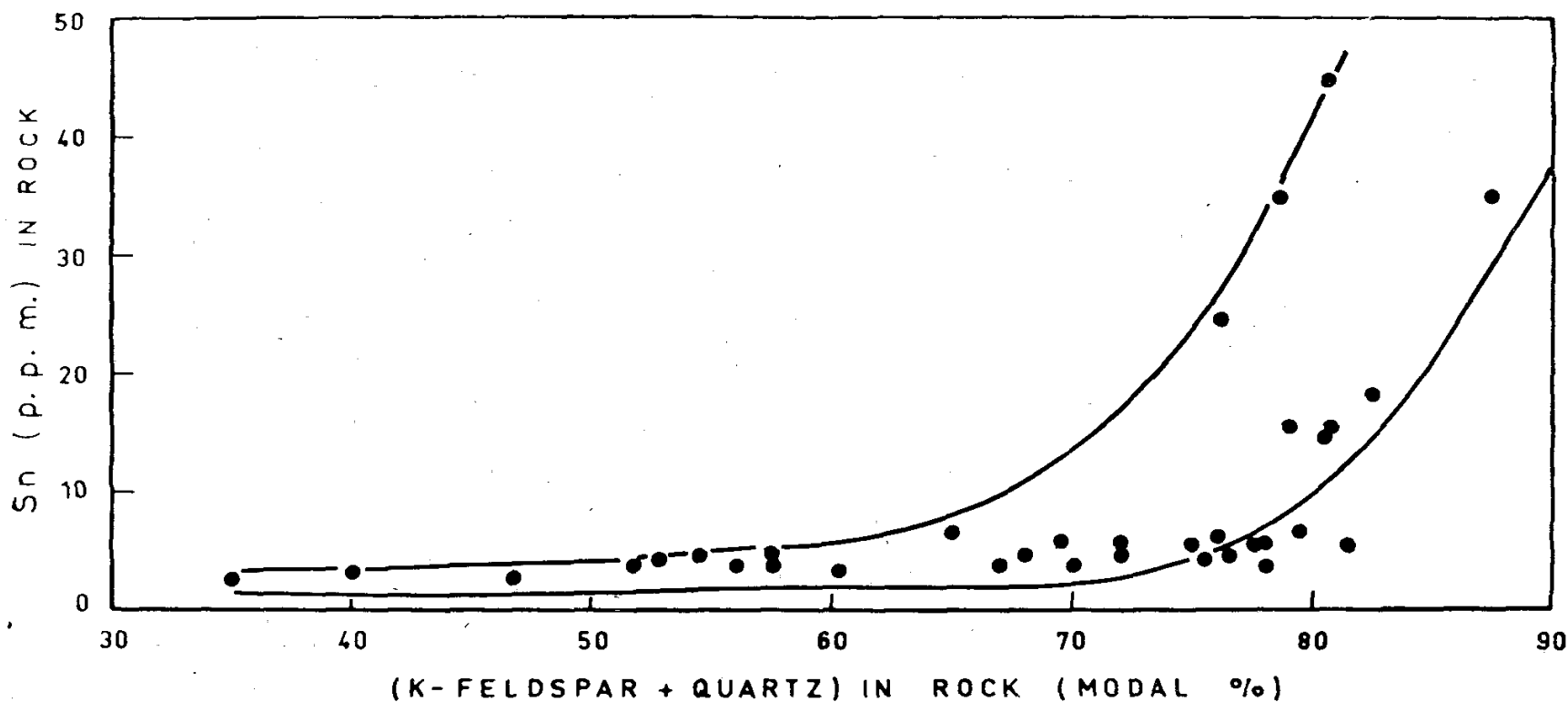
В связи с тем что З. Г. Караевой [29] был сделан вывод о связи степени рудоносности гранитоидов с интенсивностью альбитизации, которая может быть охарактеризована отношением (Na — Ca)/K, автором настоящей работы

Таблица II

Коэффициенты корреляции между окислами петрогенных элементов и оловом в гранитных породах

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	Sn
SiO ₂	1,00	-0,80	-0,49	-0,83	-0,88	-0,94	0,24	0,50	-0,65	-0,57	-0,23	0,47
Al ₂ O ₃		1,00	0,22	0,50	0,70	0,73	-0,16	-0,56	0,42	0,38	0,20	-0,40
Fe ₂ O ₃			1,00	0,27	0,34	0,43	0,15	-0,35	0,34	0,19	0,11	-0,27
FeO				1,00	0,79	0,82	-0,42	-0,44	0,70	0,61	0,17	-0,37
MgO					1,00	0,91	-0,36	-0,61	0,62	0,60	0,30	-0,30
CaO						1,00	-0,25	-0,66	0,67	0,55	0,21	-0,41
Na ₂ O							1,00	-0,17	-0,23	-0,27	-0,06	0,04
K ₂ O								1,00	-0,54	-0,35	-0,12	0,20
TiO ₂									1,00	0,48	-0,08	-0,31
P ₂ O ₅										1,00	0,26	-0,22
MnO											1,00	-0,23
Sn												1,00

Примечание. Использованы данные по 58 пробам.



ФИГ. 6. Зависимость между содержаниями олова и суммой калиевого полевого шпата и кварца в гранитоидах Австралии.

проведено изучение зависимости между этим отношением и содержанием олова в породах, но корреляции между указанными величинами не установлено.

При изучении связи минерального состава пород с содержанием в них олова выяснилось, что обычно количество олова в породах пропорционально содержанию в них суммы калиевого полевого шпата и кварца (фиг. 6), но и в этом случае имеют место некоторые исключения.

Отсутствие ясной и недвусмысленной зависимости означает, что, хотя состав пород, бесспорно, влияет на содержание в них олова, все же для определения последнего с достаточ-

ной точностью важно знать также и другие факторы. К ним относятся содержание олова в первичном материале (магма и осадки) и механизм его концентрирования (фракционная кристаллизация или перенос летучими соединениями и растворами).

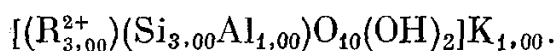
Если предположить, что первоначальный материал и механизм концентрирования во всех случаях одинаков, например фракционная кристаллизация из магмы, как считают Раттиган [38] и Л. В. Таусон [44], то необходимо допустить, что различия в содержаниях олова в породах близкого состава отражают различия в содержаниях олова в осадках, которые были

преобразованы в гранитоиды. Такое объяснение находится в соответствии с предположениями А. П. Никольского [31], Барта [8] и В. Л. Барсукова [5].

ЗАВИСИМОСТЬ МЕЖДУ ХИМИЧЕСКИМ СОСТАВОМ БИОТИТОВ И СОДЕРЖАНИЕМ В НИХ ОЛОВА

Биотит широко известен как носитель редких элементов; например, Тишендорф с соавторами [45] в недавнем обзоре ссылается на работу Сендбергера, опубликованную в 1872 г., и на многочисленные более поздние исследования.

Фостер [20] в своей работе приводит следующую формулу биотита:



где R^{2+} представляет двухвалентные катионы в октаэдрических позициях и в шестерной координации, Si и Al занимают тетраэдрические позиции в четверной координации, а K (и Na) располагаются в двенадцатеричной координации.

Наиболее часто двухвалентными катионами, занимающими октаэдрические позиции, являются Fe^{2+} , Mg^{2+} и Mn^{2+} , которые могут частично замещаться четырехвалентным Ti^{4+} , трехвалентными Fe^{3+} и Al^{3+} и одновалентным Li^+ . Возможно также замещение K^+ и Na^+ кальцием (Ca^{2+}) между слоями. Что же касается анионов, то, видимо, возможен изоморфизм между OH^- и F^- , а также между $(OH^- + F^-)$ и CO_3^{2-} .

Для объяснения вхождения олова в биотит различные авторы использовали правила, предложенные Гольдшмидтом, Рингвудом, Ноккольдсом, Деворе и Рамбергом [см. 21]. Указанные правила учитывают размеры ионов, заряды, электроотрицательность и адсорбцию. В этом отношении Sn^{4+} имеет прямое сходство с Fe^{3+} и Fe^{2+} , а также с Ti^{4+} ; Sn^{2+} , как показывают данные табл. III, может изоморфно за-

мещать Ca^{2+} . По мнению Файфа и Барнса [21], кроме кристаллохимических свойств необходимо знать термодинамические функции всех компонентов, что в настоящее время невозможно.

Советские исследователи [3, 4, 6, 15] утверждают, что олово в породах находится не в виде касситерита, а входит в решетку биотита, главным образом изоморфно к Fe^{2+} и Fe^{3+} . При изучении корреляции содержаний олова с химическим составом биотитов, которая, кстати, плохо подтверждается экспериментальными данными, они иногда используют железо-магнезиальное отношение $(Fe^{2+} + Fe^{3+}) / (Fe^{2+} + Fe^{3+} + Mg^{2+})$.

Слабая отрицательная корреляция содержания олова с отношением Fe^{2+}/Fe^{3+} в биотитах из пород Австралии [38] и ясно выраженная его связь с отношением $2Fe^{3+}/Fe^{2+} + Mg^{2+}$ в образцах из СССР [16] указывают на более важную роль Fe^{3+} в сравнении с Fe^{2+} . Из фиг. 7, показывающей распределение этих ионов в биотитах, видно, что в целом действительно наблюдается возрастание содержания олова при увеличении суммы ионов Fe^{2+} и Fe^{3+} и уменьшении отношения Fe^{2+}/Fe^{3+} . Однако положительная корреляция олова с Fe^{3+} проявляется лишь в самых общих чертах. Более четкая положительная корреляция наблюдается между содержанием олова в биотитах и железо-магнезиальным отношением в них (фиг. 8). Эта зависимость выражается кривой линией, причем в средней области значений железо-магнезиального отношения (между 0,7 и 0,8) наблюдается некоторый разброс точек. Для сравнения на фиг. 8 приведены данные по биотитам из гранитов США и СССР, для которых сохраняется та же тенденция, что и для биотитов из Австралии, но корреляционные линии занимают другое положение. Это указывает на то, что содержание олова в биотитах зависит также и от других факторов.

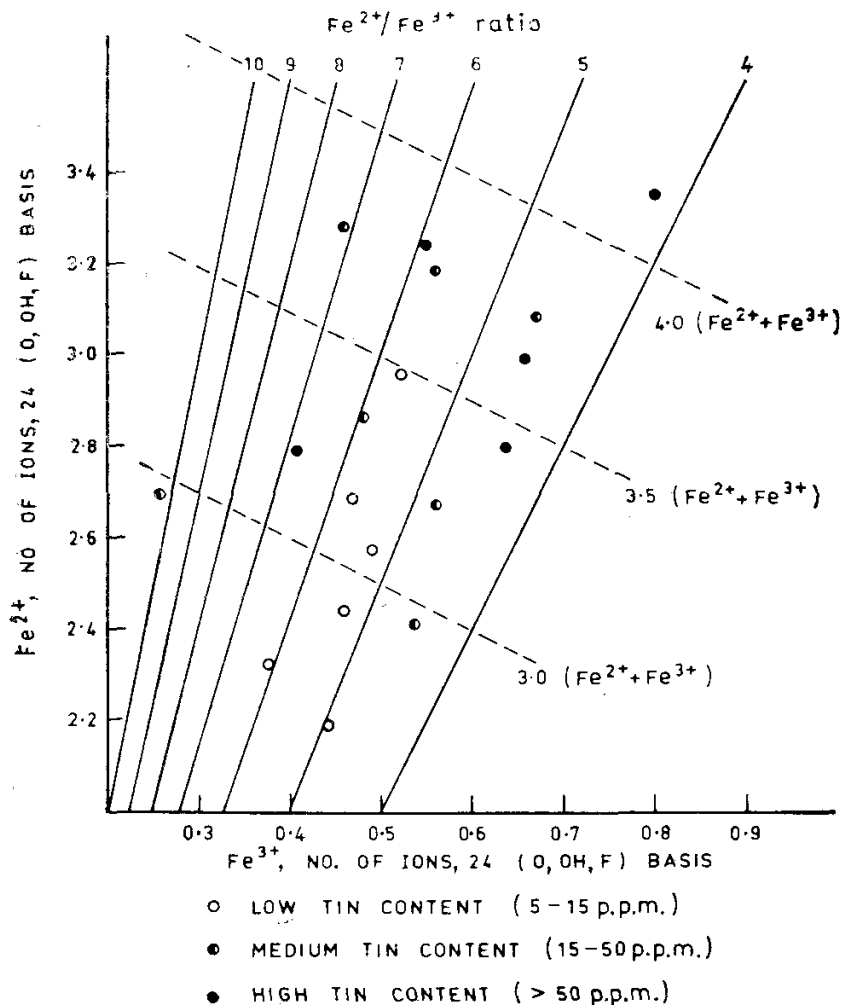
Следующим шагом в изучении корреляционных связей было исследование связей между

Таблица III

Кристаллохимические константы элементов (по Сенсбери и Гамильтону [41])

	Sn ²⁺	Ca ²⁺	Cd ²⁺	Fe ²⁺	Sn ⁴⁺	Fe ³⁺	Ti ⁴⁺	Mg ²⁺	Sc ³⁺
Радиусы ионов, Å	0,93	0,99	0,97	0,88	0,74	0,67	0,68	0,78	0,83
Электроотрицательность, эВ	1,65	1,00	1,50	1,65	1,80	1,80	1,60	1,20	1,30

Примечание. Приводимые в литературе размеры ионных радиусов различны, и некоторые авторы отдают предпочтение другим цифрам.

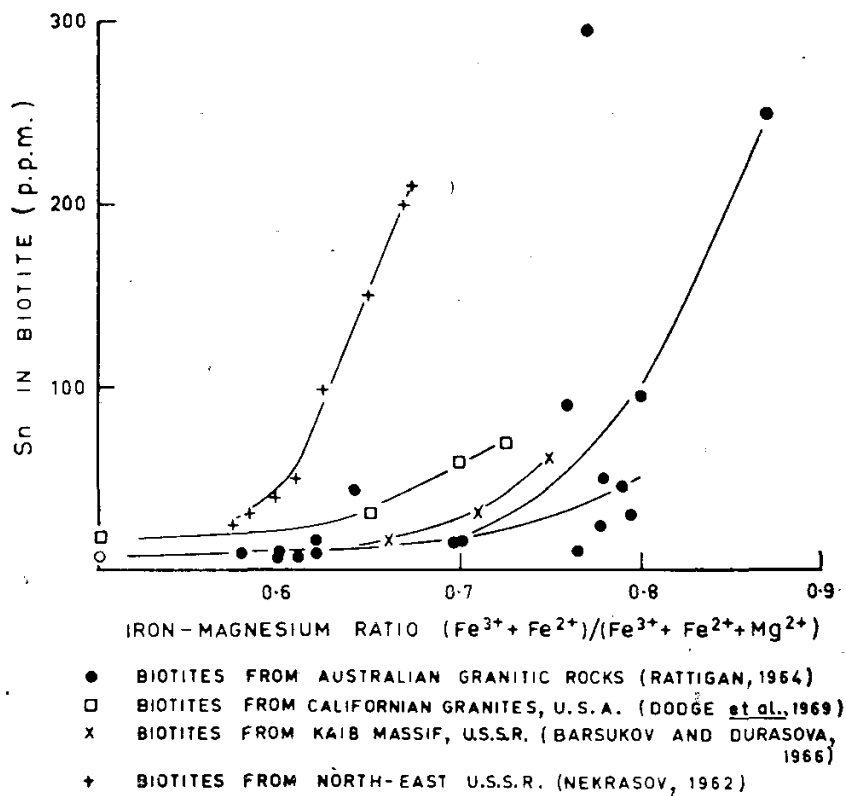


ФИГ. 7. Содержание железа в биотитах.
По вертикальной оси — Fe^{2+} , число ионов в расчете на 24 (O, OH, F); по горизонтальной оси — Fe^{3+} , число ионов в расчете на 24 (O, OH, F).

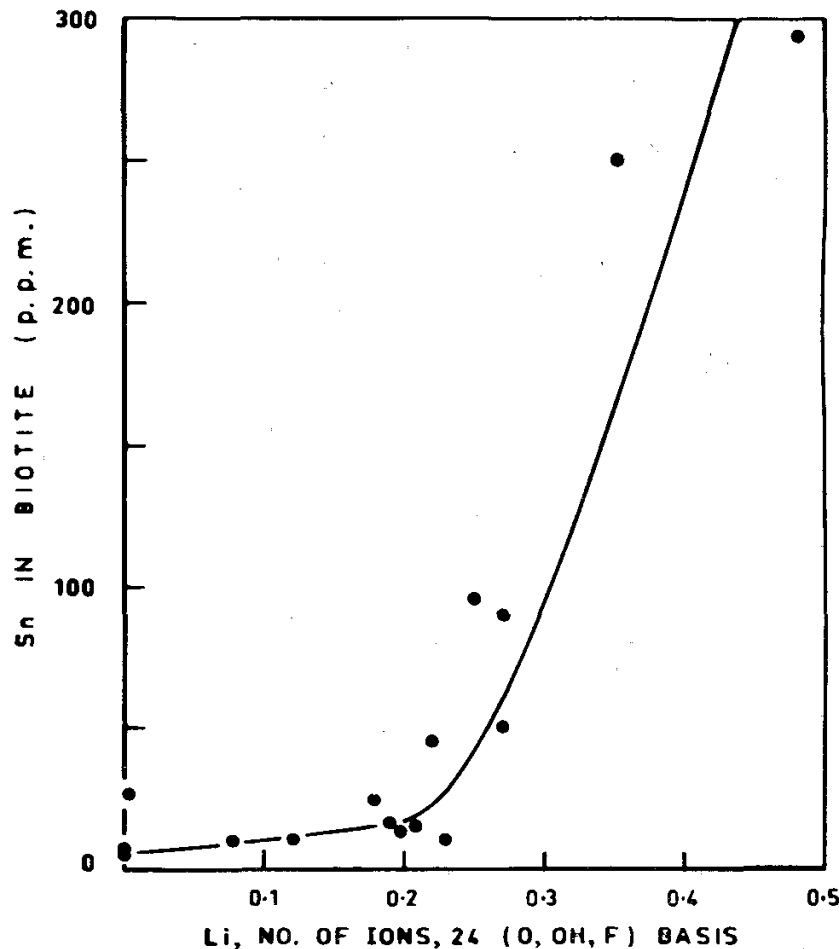
содержаниями в биотитах олова и других занимающих октаэдрические позиции катионов, с которыми возможен изоморфизм этого элемента.

Только для содержаний олова и титана была установлена четкая отрицательная корреляция, которая объясняется либо конкуренцией между этими элементами в отношении свободных позиций в решетке биотита, либо различием во времени их кристаллизации. Сходные, но более слабые отрицательные корреляционные связи были установлены между концентрацией олова в биотитах и содержанием в них Mg, Ca и Al, занимающего тетраэдрические позиции, а также между содержанием олова и суммой Ti и Mg. Олово в биотитах не коррелируется с калием и натрием, но для него характерна хорошая положительная корреляция с литием (фиг. 9), которую можно объяснить исходя из предположения о том, что $(Li^+ + Fe^{3+})$ изоморфно замещают $(Fe^{2+} + Mg^{2+})$ в решетке биотита [3].

Принимая во внимание вышесказанное, можно вывести коэффициент, который будет связывать химический состав биотита с содержанием в нем олова. Этот коэффициент, назван-



ФИГ. 8. Зависимость между содержанием олова в биотитах и железо-магнезиальным отношением в них.

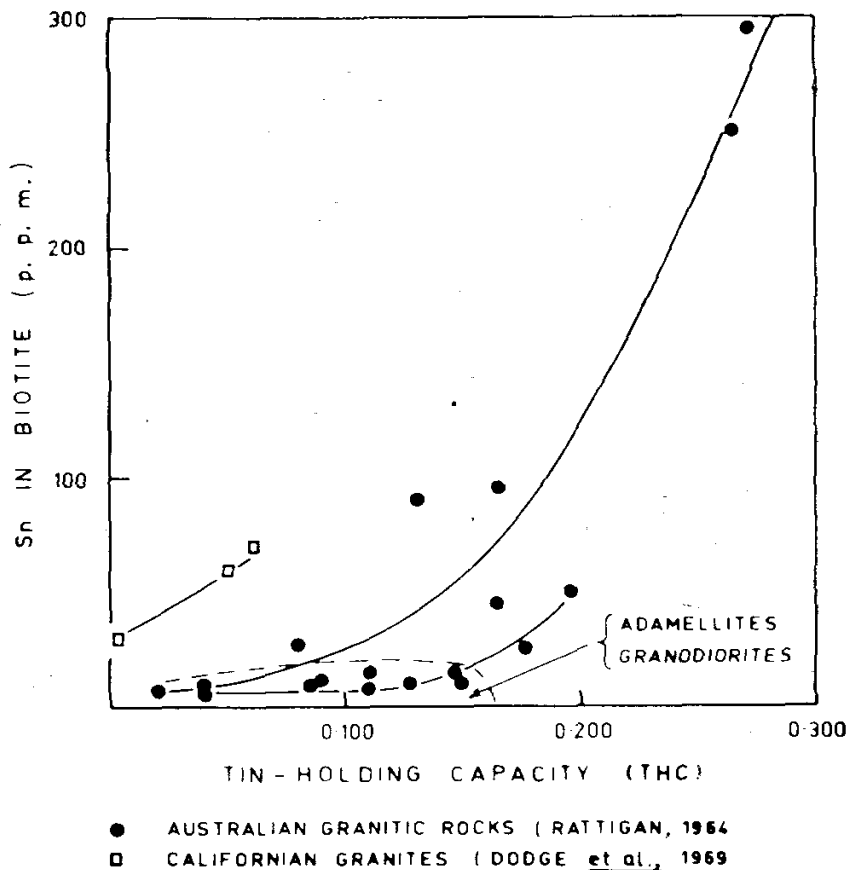


ФИГ. 9. Корреляция между оловом и литием в биотитах.

ный «емкостью биотита в отношении олова» (E)¹ определяется как

$$E = \frac{Fe^{3+} + Li^+}{Fe^{2+} + Mg^{2+}} - \frac{Ti^{4+} + Mn^{2+}}{10}$$

¹ В американской литературе — ТНС. — Прим. ред.



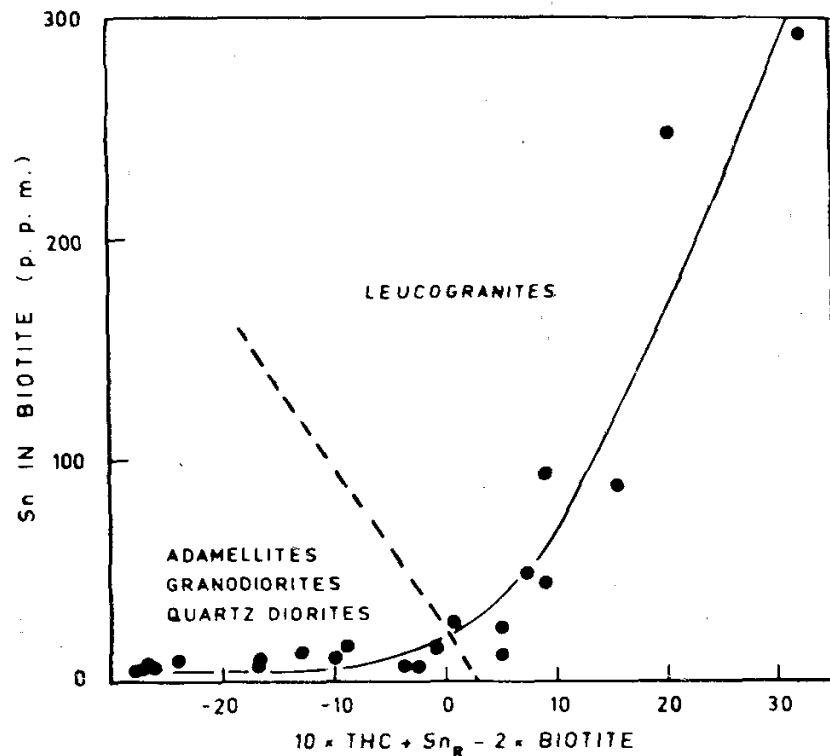
ФИГ. 10. Зависимость между содержанием олова в биотитах и «емкостью биотита в отношении олова» (E).

Зависимость между содержаниями олова в биотитах и соответствующими значениями показана на фиг. 10. Несмотря на то что для групп точек были получены четкие положительные корреляционные связи, необходимо, по-видимому, кроме химического состава учитывать и другие факторы.

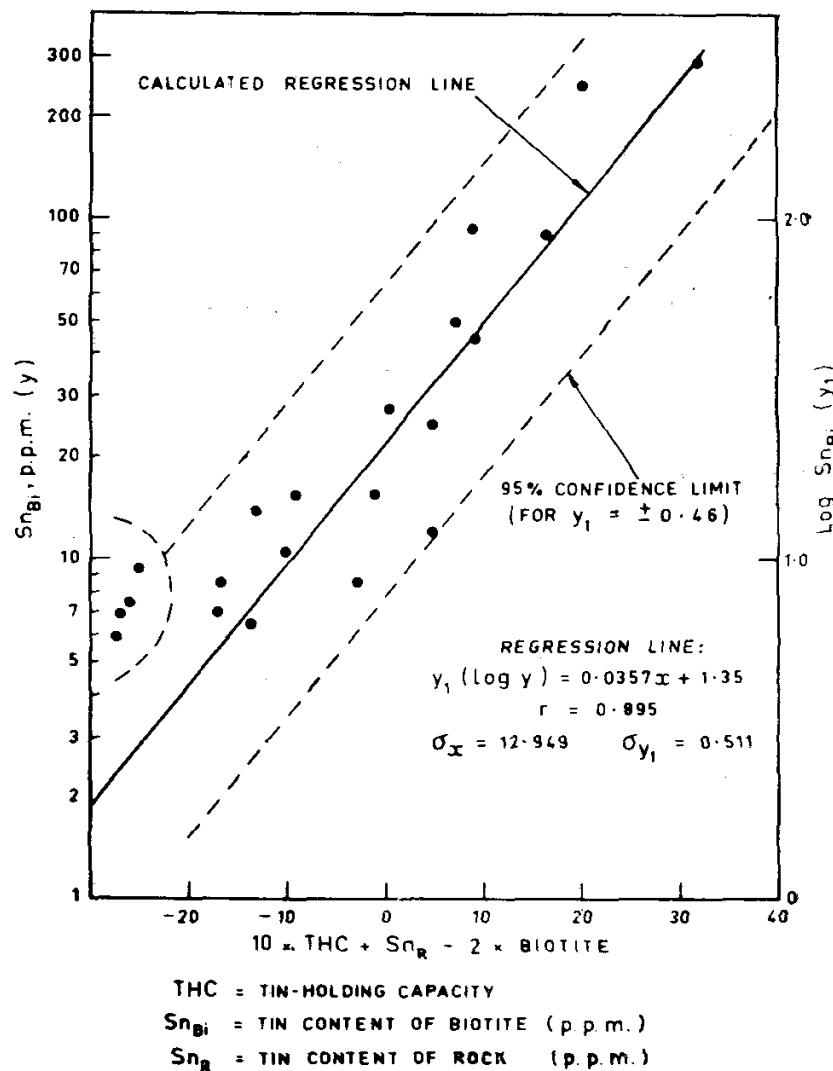
Очевидно, что содержание олова в биотитах прямо пропорционально общему содержанию олова в породах и обратно пропорционально модальному содержанию в них биотита. При данном содержании олова в породе концентрация его в биотите тем ниже, чем выше в этой породе содержание биотита. Было обчислено несколько комбинаций из этих трех факторов, но наиболее четкая корреляция наблюдается между содержанием олова в биотитах и X, определенным по следующему уравнению:

$$X = 10E + Sn_{II} - 2Bi,$$

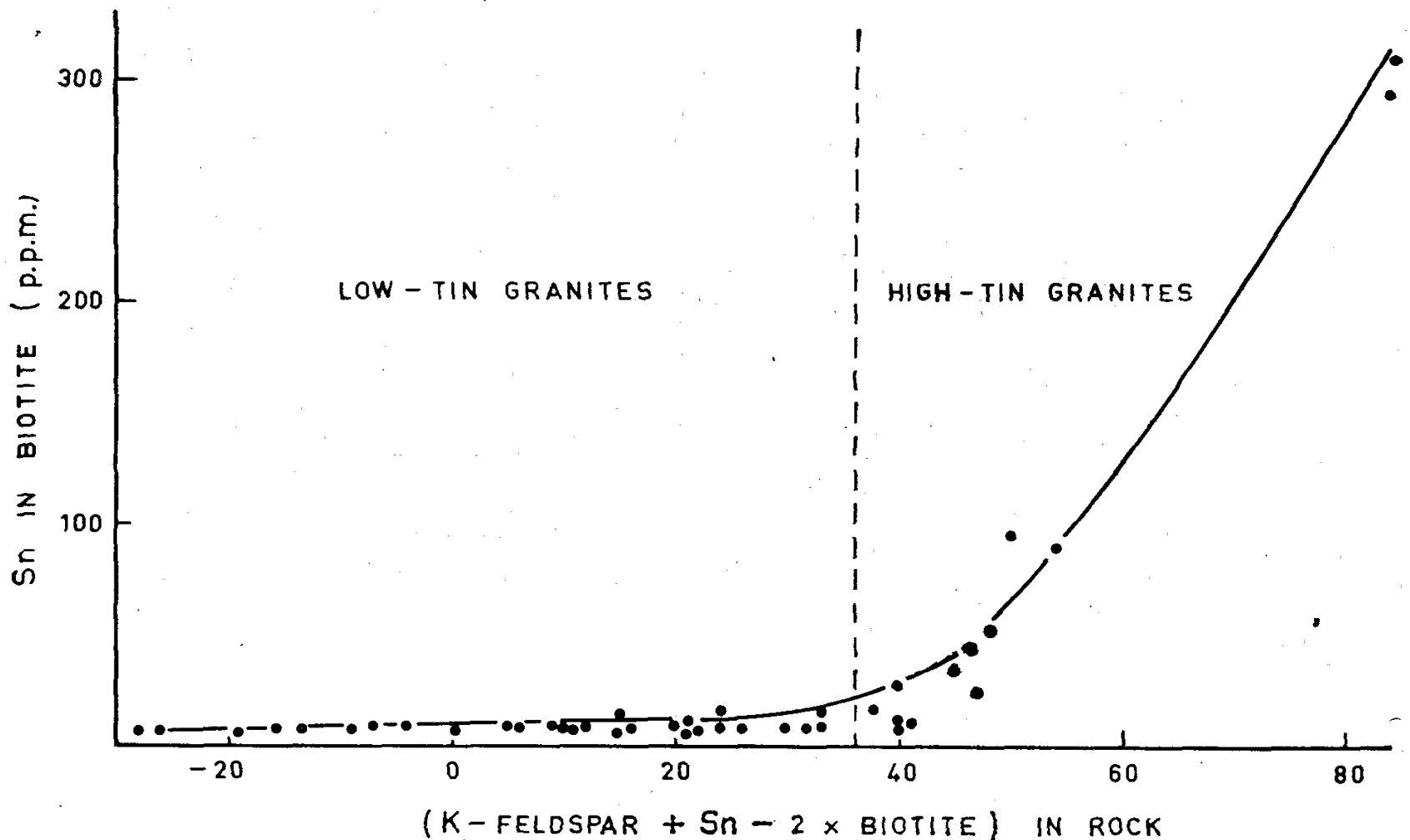
где Sn_{II} — содержание олова в породе, $млн^{-1}$, а Bi — модальное содержание биотита в породе. На фиг. 11 показана четкая криволинейная зависимость содержаний олова в биотитах от X. Так как кривая, отражающая эту зависимость, является экспонентой, на график были нанесены логарифмы содержаний олова в биотитах (фиг. 12). В результате, как и предполагалось, была получена линейная корреляция их с X



ФИГ. 11. Содержание олова в биотитах как функция коэффициента $(10E + Sn_{Bi} - 2Bi)$.



ФИГ. 12. $\lg Sn_{Bi}$ как функция коэффициента $(10E + Sn_{Bi} - 2Bi)$.



ФИГ. 13. Зависимость между содержанием олова в биотитах и значениями коэффициента (калиевый полевой шпат + Sn - 2Bi) в породах.

со статистически высоким уровнем значимости ($r = 0,895$). Уравнение регрессии при 95% -ном уровне значимости было рассчитано как

$$\lg \text{Sn}_{\text{Bi}} = 0,0357X + 1,35 \pm 0,46,$$

где Sn_{Bi} — содержание олова в биотите, млн⁻¹.

Была также предпринята попытка выявить корреляционные связи между содержанием олова в биотитах и химическим и минеральным составом пород. Исследовались отношения содержания олова в биотитах с содержаниями Ti, K, Al_{тетр} и калиевого полевого шпата в породах, а также с железо-магнезиальным отношением, $\Sigma \text{Fe} / (\Sigma \text{Fe} + \text{Mg})$, но четких корреляционных связей обнаружить не удалось. Была выявлена хорошо выраженная криволинейная зависимость содержания олова в биотитах от значений коэффициента (калиевый полевой шпат + Sn - 2Bi) в породах (фиг. 13).

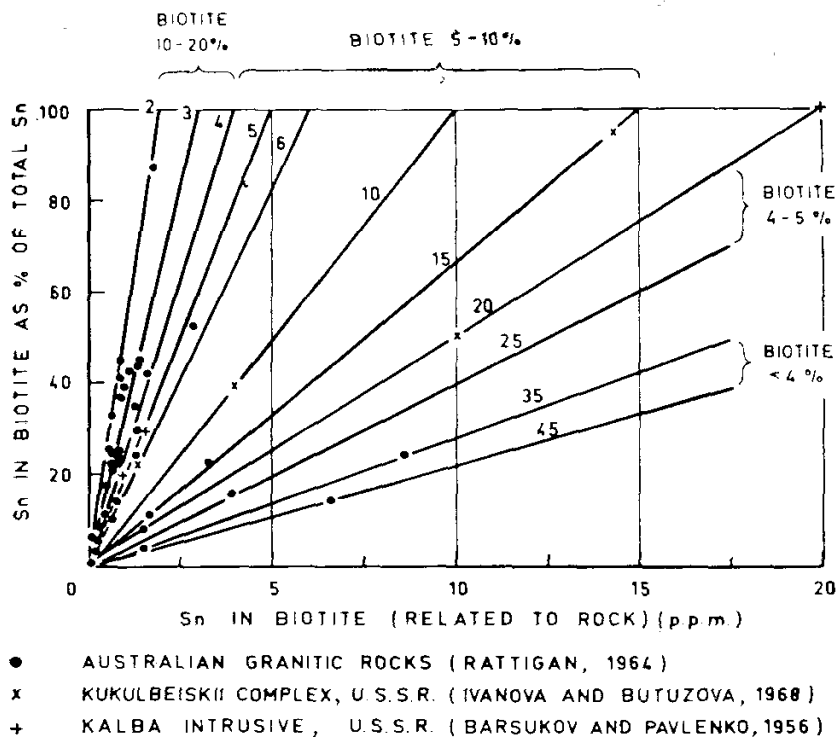
Используя приведенное выше уравнение, содержание олова в породах можно рассчитать исходя из: 1) содержания олова в биотитах, 2) их химического состава и 3) модалного содержания биотита в породах. Если значение первого не известно, для расчетов может быть использовано содержание калиевого полевого

шпата в породах, установленное по графику фиг 13.

СТЕПЕНЬ НАКОПЛЕНИЯ ОЛОВА В БИОТИТАХ

Для решения следующего вопроса, рассматриваемого в настоящей работе, необходимо установить, какое количество олова, содержащегося в породах, находится в биотите. Согласно данным В. Л. Барсукова и А. С. Павленко [3], в Калбинском массиве 80—100% всего олова гранитов входит в биотит. Опыты по центрифугированию биотитов, выполненные В. Л. Барсуковым [4], показали, что олово в этом минерале находится не в форме касситерита, а входит изоморфно в его решетку.

На фиг. 14 приведены данные, показывающие степень накопления олова (СНО) в биотитах из гранитных пород Австралии, а также изолинии содержания всего олова в породах. В противоположность утверждению В. Л. Барсукова и А. С. Павленко [3] в биотитах из этих проб концентрируется в большинстве случаев менее 45% общего количества олова, содержащегося в породах, а в биотитах из наиболее богатых



ФИГ. 14. Количество олова в гранитоидах, приходящееся на биотит. Цифры на линиях показывают содержание олова в породах (млн⁻¹).

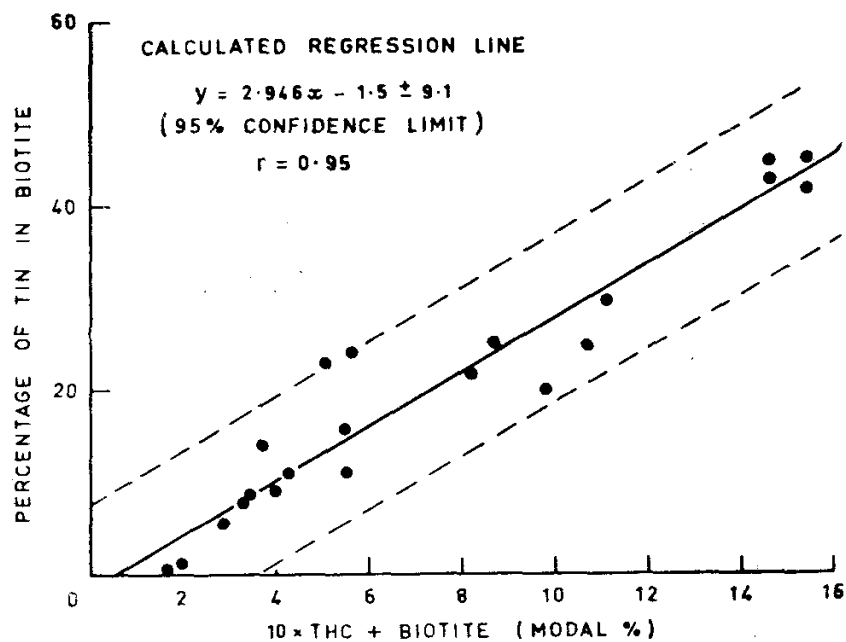
оловом гранитов — всего 10—20%. Что касается биотитов из гранитов других районов мира, то данных по ним недостаточно для того, чтобы определить степень накопления в них олова, за исключением немногочисленных публикаций по породам СССР [3, 26, 48]. Из фиг. 14 видно, что, по сути дела, только в двух случаях биотит является единственным концентратором олова, тогда как в остальных степень накопления этого элемента в биотите варьирует между 20 и 50%. Некоторые советские авторы [35] указывают, что иногда, особенно в бедных оловом породах, большая часть олова концентрируется в сфене (несмотря на то что содержание сфена в породах составляет менее 2%, он может быть обогащен оловом до 1200 млн⁻¹).

Относительное содержание олова в биотите, выраженное в процентах от всего олова, содержащегося в породе, должно зависеть от способности биотита «абсорбировать» олово, от количества биотита в породе и от состава и количества в породе других минералов, влияющих на коэффициент распределения олова между различными компонентами породы. Для проанализированных гранитоидов Австралии были известны только первые два фактора. Выявлена четкая положительная корреляция (фиг. 15) между относительным содержанием олова в биотите, выраженным в процентах от всего содержания олова породы, с значениями коэффициента (10E + Bi). Коэффициент корреляции равен 0,25 (со статистически очень высоким уровнем

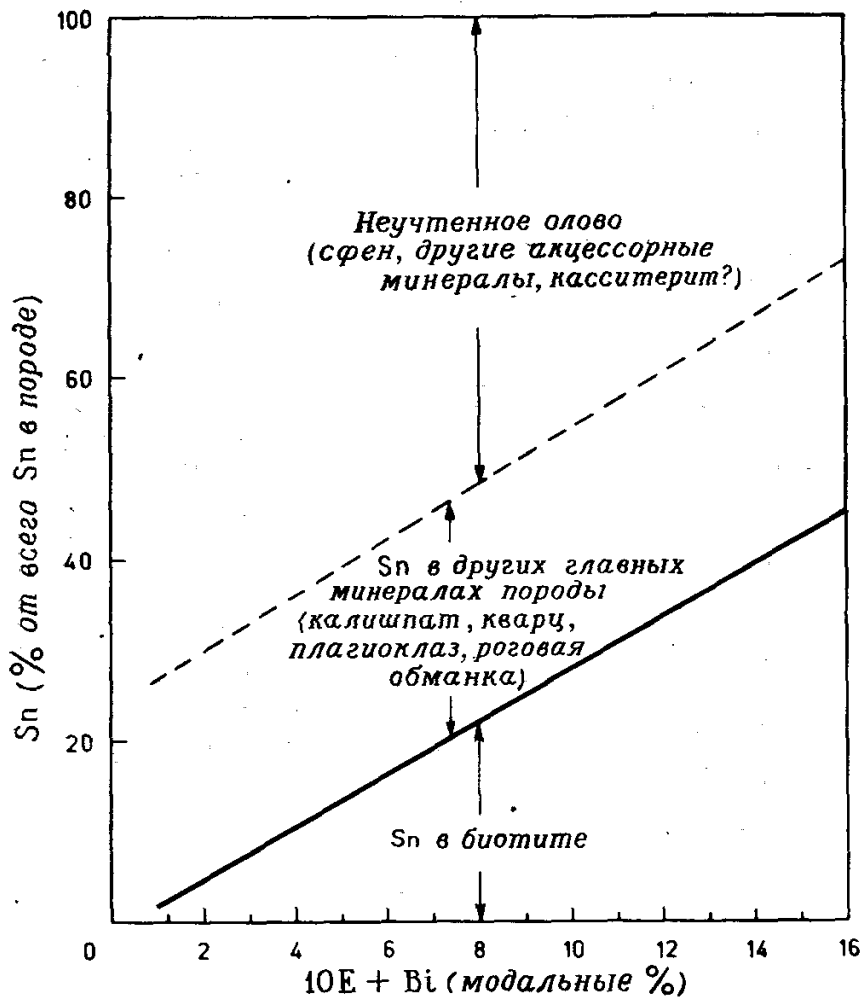
значимости) и уравнение линии регрессии имеет вид $CHO = 2,946(10E + Bi) - 1,5 \pm 9,1$ (95% уровень значимости); где $CHO = (Sn_{Bi}^1 / Sn_{\Pi}) \times 100$; $Sn_{Bi}^1 = (Sn_{Bi} \cdot Bi) : 100$; Bi — модальное содержание биотита в породе (%), E — емкость биотита в отношении олова.

Тот факт, что относительное процентное содержание олова, приходящегося на биотит, с большой точностью может быть рассчитано исходя из химического состава и количества биотита в породе без учета коэффициента распределения олова между биотитом и другими минералами, показывает, что в рассматриваемых образцах общий коэффициент распределения олова между биотитом и остальной частью породы должен быть чуть ли не константой.

Поскольку выяснилось, что в биотите концентрируется лишь сравнительно небольшая часть олова, содержащегося в породах, для последних был рассчитан полный баланс, позволяющий определить в каких еще минералах концентрируется этот элемент. Результаты показали (фиг. 16), что в отличие от биотитов остальные породообразующие минералы (калиевый полевой шпат, кварц, плагиоклаз и в некоторых случаях роговая обманка) содержат 20—25% всего олова гранитоидов. Калиевый полевой шпат, кварц и плагиоклаз обычно бедны оловом (<2 млн⁻¹). Заметная роль этих минералов в балансе олова объясняется большим их количеством в породах. Из фиг. 16 видно, что 20—75% содержащегося в породах олова оказывается неучтенным. В будущем при проведении экспериментальных работ необходимо выяснить, в какой форме находится в породах недостающее олово. Возможно, оно связано с акцессорными



ФИГ. 15. Количество олова породы, приходящееся на биотит, как функция (10E + Bi).



ФИГ. 16. Общий баланс олова в гранитоидах Австралии.

минералами, например со сфеном, или присутствует в форме тонкораспыленного касситерита, установленного в некоторых образцах.

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ОБРАЗОВАНИЯ ОЛОВОРУДНОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ

Полученные данные показывают, что биотит является важным концентратором олова и что можно установить точные соотношения между содержаниями олова в биотите и породе, если учесть модаловое содержание биотита в породе и его химический состав. Содержание касситерита в породах, однако, не может быть определено исходя из установленных взаимоотношений.

Здесь необходимо выяснить следующие вопросы.

1. Каков механизм высвобождения олова из биотитов?

2. Всегда ли образованию касситерита предшествует концентрирование олова в биотите или олово концентрируется каким-либо другим способом, например в форме летучих соединений, и затем переходит непосредственно в касситерит, не входя в решетку биотита?

В последнее время было выдвинуто несколько гипотез, освещающих эти вопросы. То, что они во многом противоречат одна другой, указывает на необходимость проведения дальнейших экспериментальных работ. Раттиган [38] считает, что биотит теряет олово при воздействии кислой среды, отвергая тем самым вариант щелочного метасоматоза, предложенный В. Л. Барсуковым [3, 4]. С другой стороны, Л. В. Дмитриев и др. [16] установили, что олово может быть легко перераспределено при увеличении щелочности биотитсодержащих пород под воздействием гидротермальных растворов. При этом часть олова, освободившегося из биотита, может пойти на образование касситерита, а часть входит в роговую обманку или магнетит. Если такой механизм образования касситерита является ведущим, то содержание олова в биотитах из пород, обогащенных касситеритом, должно быть низким. В этом находят свое объяснение наблюдения Хоскинга [24, 25] и Бредшоу [11], изучавших граниты Корнуэлла, и Чауриса [14], исследовавшего гранитоиды северной Франции, где биотиты с низкими концентрациями олова характерны для пород с высоким содержанием рудных минералов.

Советскими учеными [5, 32] замечено, что наиболее высокие концентрации олова в форме касситерита характерны для поздних интрузивных фаз. Они предполагают, что олово накапливается в расплаве в форме станната натрия (Na_2SnO_3), при гидролизе которого образуется касситерит. Станнат натрия устойчив при температуре более 700°C , что приводит к накоплению олова в остаточных расплавах. Неустойчивость калиевого аналога этого соединения в тех же условиях является, по мнению авторов, причиной того, что в лейкократовых пегматоидных гранитах, богатых калием, олово не накапливается. Однако имеющиеся данные по гранитоидам Австралии не подтверждают это.

Н. Е. Залашкова и А. А. Ситнин [48], изучавшие процесс метасоматического изменения гранитоидов Забайкалья, установили, что «апограниты», являющиеся продуктами метасоматических преобразований, богаче оловом, чем исходные породы, за счет которых они образовались (соответственно 32 и 20 млн⁻¹).

Рассматривая природу метасоматоза, В. Л. Барсуков [4] и В. Л. Барсуков и А. Г. Волосов [7] выявили важную роль фторсодержащих гидротермальных растворов, которые могут переносить олово в форме $\text{Na}_2\text{Sn}(\text{OH}, \text{F})_6$. Гидролиз последнего приводит к образованию касситерита. По данным Сайнсбери и Гамильтона [41], важными агентами при транспортировке олова являются летучие соединения SnF_4 и

SnCl_4 . Недавняя работа по исследованию вытяжек из жидких включений [40] подтверждает вывод о том, что хлоридные растворы наиболее богаты рудным компонентом.

Для выявления рудоносных зон может оказаться полезным изучение характера распределения редких элементов в окружающих породах и в касситерите. Бредшоу [12] отметил равномерный характер распределения концентраций редких элементов в неизмененных гранитах и смежных зонах минерализации, в то время как между двумя главными рудными зонами наблюдаются характерные положительные и отрицательные пики содержаний. А. В. Зильберминц [49] и Радкевич с соавторами [36] выявили вертикальную зональность в распределении редких элементов в касситеритах, отобранных на различных глубинах. Содержания In, Sc, Fe и Nb в них уменьшаются с глубиной, а концентрации Ta и W, наоборот, увеличиваются, причем отмечены заметные различия для касситеритов, ассоциирующих с кварцем или сульфидами.

Учитывая все имеющиеся данные по вопросу об образовании касситерита, можно предположить, что биотиты с высоким содержанием олова являются потенциальным источником для руд этого элемента, а следовательно, и металлогеническим индикатором потенциальной оловяносности. В дальнейшем необходимо провести экспериментальные работы для выяснения 1) механизма высвобождения олова из биотитов и 2) других путей, кроме концентрирования олова в биотите, которые могут привести к образованию касситерита из летучих соединений этого элемента.

ВЫВОДЫ

Статический анализ имеющихся данных по гранитам, амазеллитам и гранодиоритам Австралии привел к следующим основным выводам.

1. Гистограмма распределения кремнезема в породах имеет бимодальный вид (модальные значения равны 71,5 и 76,0% SiO_2), она характеризуется слабой отрицательной асимметрией и обнаруживает сходство с кривой распределения SiO_2 в гипабиссальных гранитоидах.

2. Распределение олова в породах и биотитах характеризуется сильной положительной асимметрией и не соответствует ни логнормальному, ни гамма-распределению, но обнаруживает сходство с распределением типа бета-1. В породах с низкими концентрациями олова ($<5 \text{ млн}^{-1}$) содержится в среднем $3,5 \text{ млн}^{-1}$ этого элемента, а в породах с высокими содержаниями ($>5 \text{ млн}^{-1}$) — 16 млн^{-1} . В биотитах содержание олова значительно выше, чем в породах. В биотитах из пород с низкими концентрациями олова содержится в среднем 9 млн^{-1} этого элемента, а в биотитах из пород, богатых оловом, — 107 млн^{-1} .

3. Количество биотита в породах варьирует в пределах 0—27% и обычно увеличивается с уменьшением в породах содержания SiO_2 . Состав биотита варьирует с изменением содержания SiO_2 в породах. Согласно данным Раттигана [38], лишь некоторые биотиты были затронуты метасоматическими процессами.

4. Несмотря на то что более высокие концентрации олова обычно характерны для пород с высокими содержаниями SiO_2 (75—77%), отчетливой корреляции между оловом и SiO_2 , а также между оловом и каким-либо другим простым химическим или минералогическим параметром пород не наблюдается. Отсутствие таких связей наводит на мысль о том, что содержание олова в породах определяется его концентрациями в исходном материале, в частности в осадках, которые впоследствии были преобразованы в гранитоиды.

5. Олово тесно связано с катионами, занимающими октаэдрические позиции в решетке биотита. Наблюдаются положительные корреляционные связи этого элемента с Fe^{3+} и Li^+ и отрицательные — с Ti^{4+} , Mn^{2+} , Fe^{2+} и Mg^{2+} . Для характеристики зависимости содержания олова в биотите от его химического состава предлагается сложный коэффициент, который учитывает соотношение всех катионов, находящихся в шестерной координации; он назван «емкостью биотита в отношении олова» (E).

6. Содержание олова в породах нельзя считать исходя непосредственно из концентрации олова в биотитах. При корреляции этих характеристик необходимо учитывать химический состав биотита, выраженный через посредство коэффициента E, и модальное содержание биотита в породе. Содержание олова в биотите связано экспонентной зависимостью с коэффициентом, который учитывает все три упомянутые выше характеристики. Для логарифмов содержаний олова в породах и биотитах установлена линейная зависимость, которая пригодна для определения содержаний олова в

¹ Малая вероятность участия простых галоидных соединений в переносе олова и других редких элементов в надкритических и гидротермальных растворах проанализирована в работе А. А. Беуса и Б. П. Соболева «О галоидном переносе элементов в эндогенных процессах», 1962, в которой обосновывается ведущая роль комплексных соединений в эндогенном переносе металлов. — *Прим. ред.*

породах исходя из концентраций его в биотитах. Для метасоматически измененных биотитов такого уравнения регрессии не установлено.

7. Степень накопления олова в биотитах (СНО) в гранитоидах Австралии, т. е. количество олова, содержащегося в биотитах (неизмененных), выраженное в процентах от содержания олова в породах, относительно низкое (<45%) в противоположность некоторым гранитам из СССР, в которых биотиты содержат до 80—100% всего олова породы. К тому же этот параметр зависит от химического состава (Е) и количества биотита в породе. Если известно то и другое, то значение СНО может быть точно определено исходя из прямолинейной корреляционной зависимости между ними.

8. Установленные корреляционные связи пригодны для описания зависимости между содержаниями олова в биотитах и породах, но они не позволяют определить потенциальную рудоносность пород, т. е. то относительное количество олова, которое присутствует в форме касситерита. Хотя высокое содержание олова в биотитах, вероятно, является индикатором потенциальной рудоносности, в настоящее время еще недостаточно информации, чтобы установить механизм высвобождения олова из биотита и решить, насколько важную роль играет этот механизм в процессе рудообразования по сравнению с концентрациями олова в форме других соединений (т. е. Na_2SnO_3 , SnF_4 , SnCl_4), при гидролизе которых может образоваться касситерит. Для выяснения этих вопросов необходимо провести экспериментальные работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ahlfeld F.*, Zinn und Wolfram (Die Metallischen Rohstoffe, Bd. 11), Stuttgart, F. Enke, 212, 1958.
2. *Ahrens L. H.*, Element Distributions in Igneous Rocks, Chemistry of the Earth's Crust, Proc. Centennial Vernadskiy Conference, Moscow, 2, 315—322, 1966.
3. *Барсуков В. Л., Павленко Л. И.*, Распределение олова в гранитоидных породах, ДАН СССР, 109, № 3, 1956.
4. *Barsukov V. L.*, The Geochemistry of Tin, Geochemistry № 1, 41—51, 1957.
5. *Barsukov V. L.*, Metallogenic Specialization of Granitoid Intrusions, Chemistry of the Earth's Crust, Proceedings of Centennial Vernadskiy Conference, Moscow, 2, 211, 1966.
6. *Barsukov V. L., Durasova N. A.*, Metall Content and Metallogenic Specialization of Intrusive Rocks in the Regions of Sulphide-Cassiterite Deposits, Geochemistry, № 2, 168—179, 1966.
7. *Barsukov V. L., Volosov A. G.*, New Ways in the Development of Geochemical Methods of Mineralization Forecast at Depth as Exemplified by Sulphide-Cassiterite Deposits, Abs. of Paper submitted to XXIII Session of Int. Geol. Congress, Prague, 1968.
8. *Barth T. W. F.*, Ideas on the Interrelation Between Igneous and Sedimentary Rocks, Soc. Geol. Finland, C.R., № 33, 1961.
9. *Bastron H., Barnett P. R., Murata K. J.*, Method for the Quantitative Spectrochemical Analysis of Rocks, Minerals, Ores and Other Materials by a Powder D.C. Arc Technique, U.S. Geological Survey, Bull. 1084G, 165, 1960.
10. *Beus A. A., Sitnin A. A.*, Geochemical Features of the Kukulbeiskii Granitic Intrusive Complex in Eastern Transbaykal, Geochem. Int., 4 (5), 1005—1012, 1967.
11. *Bradshaw P. M. D.*, Distribution of Selected Elements in Feldspar, Biotite and Muscovite from British Granites in Relation to Mineralization, Trans. Instn. Min. Met., 76B, 137—148, 1967.
12. *Bradshaw P. M. D.*, The Distribution of Major and Trace Elements in Wall Rock, Greevor Tin Mine, Cornwall, paper submitted for Symposium «Geochem. and Geophys. Prospecting for Deep-Seated Deposits», org. by Int. Ass. of Geochem. and Cosmochemistry, XXIII Session of Int. Geol. Congress, Prague, 1968.
13. *Butler J. R.*, The Geochemistry and Mineralogy of Rock Weathering, 1, The Lizard Area, Cornwall, Geochim. et Cosmochim. Acta, 4, 157—178, 1953.
14. *Chauris L.*, Les minéralisations pneumatolytiques du Massif Armoricaïn, Mémoires du BRGM, № 31, 1965.
15. *Dmitriyev L. V., Barsukov V. L., Durasova N. A.*, Change in Paragenesis as a Factor in the Distribution and Mobilization of Ore Elements in Granites, Geochem. Int., 5 (2), 268—270, 1968.
16. *Dmitriyev L. V., Kotina R. P., Moiseyeva R. P.*, Variations in the Composition of Biotite and the Conditions of Its Stability in Granites of Different Petrochemical Types as Illustrated by the Kaib Massif, Geochemistry, № 3, 248—265, 1962.
17. *Dodge F. C. W., Smith V. C., Mays R. E.*, Biotites from Granitic Rocks of the Central Sierra Nevada Batholith, California, Journal of Petrology, 10 (2), 250—271, 1969.
18. *Flinter B. H.*, private communication, 1969.
19. *Flinter B. H.*, Tin in Acid Granitoids, The Search for a Geochemical Scheme for Mineral Exploration, paper presented to 3rd Int. Geochem. Expl. Symp., Toronto, Apr. 16—18, 1970.
20. *Foster M. D.*, Interpretation of the Composition of Triocathedral Micas, U.S. Geol. Survey, Prof. Paper, 354 B, 1960.
21. *Fyfe W. S., Burns R. G.*, Trace Element Rules and Their Significance, Chem. Geol., 2, 89—104, 1967.
22. *Hawley C. C., Huffman C., Hamilton J. C., Rader L. F.*, Geologic and Geochemical Features of the Redskin Granite and Associated Rocks, Lake George Beryllium Area, Colorado, U.S. Geol. Survey, Prof. Paper, 550C, 138—147, 1966.
23. *Hess F. L., Hess E.*, Bibliography of the Geology and Mineralogy of Tin, Smithsonian Misc. Colln., 58 (2), 408, 1912.
24. *Hosking K. F. G.*, The Search for Tin, Mining Magazine, 113 (4), 261—273, 368—383, 448—461, 1965.
25. *Hosking K. F. G.*, The Relationship Between Primary Deposits and Granitic Rocks, Techn. Conf. on Tin, London, 1967, 1, 267—311, 1967.
26. *Ivanova G. F., Butuzova Ye. G.*, Distribution of Tungsten, Tin and Molybdenum in the Granites of Eastern Transbaykalia, Geochem. Int., 5 (3), 572—583, 1968.
27. *Jedwab J.*, Granites à deux micas de Guéhenno et de La Villelder (Morbihan-France), Bull. de La Loc. Belge de Géol., 64, 526—534, 1955.
28. *Joplin G. A.*, Chemical Analyses of Australian

- Rocks, Part I, Igneous and Metamorphic, Comm. of Aust. Dept. of Natl. Development, Bull. № 65, 1963.
29. Караева З. Г., Петрохимические особенности рудоносности гранитоидов, ДАН СССР, 179, № 6, 1968.
 30. Некрасов И. Я., Магматизм и рудоносность северо-западной части Верхоянско-Чукотской складчатой области, Изв. Якутск. фил. СО АН СССР, сер. геол., № 12, 1962.
 31. Никольский А. П., О генезисе оловоносной магмы, «Сов. геология», № 4, 1941.
 32. Odikadze G. L., Distribution of Ta, Nb, Sn and F in Micas from Granitoids of the Greater Caucasus and the Dzhirula Crystalline Massif, Geochim. Inst., 4 (4), 754—563, 1967.
 33. Oertel A. C., Frequency Distributions of Element Concentrations, Geochim. et Cosmochim. Acta, 33 (7), 821—831, 1969.
 34. Onishi H., Sandell E. B., Meteoritic and Terrestrial Abundance of Tin, Geochim. et Cosmochim. Acta, 12, 262—270, 1957.
 35. Petrova Z. I., Legeydo V. A., Geochemistry of Tin in the Magmatic Process, Geokhimiya, № 4, 482—489, 1965.
 36. Radkevich E. A., Kokorin A. M., Korostalev P. G., Osipova G. A., Some Mineralogical-Geochemical Indicators of the Depth of Tin-Bearing Zone Mineralization, paper submitted to XXIII Session of Int. Geol. Congr., Prague, 1968.
 37. Rattigan J. H., Geochemical Ore Guides and Techniques in Exploration for Tin, Proc. Australas. Inst. Min. Met., № 207, 137—151, 1963.
 38. Rattigan J. H., Geochemical Characteristics of Australian Granitic Rocks in Relation to the Occurrence of Tin, Ph.D. thesis, University of New South Wales, 1964.
 39. Ridge J. D., Tin Resources, Chapter 4, Materials Survey, Tin, Penns. State Coll., Div. Mineral Economics, 180, 1953.
 40. Roedder E., Fluid Inclusions as Samples of the Ore-Forming Fluids in Genetic Problems of Ores, Proc. 21st Intntl. Geol. Congr., Norden, Pt. 16, 218—229, 1960.
 41. Sainsbury C. L., Hamilton J. C., The Geology of Lode Tin Deposits, Technical Conf. on Tin, London, 1, 267—306, 1967.
 42. Schuiling R. D., Tin Belts Around the Atlantic Ocean, Technical Conf. on Tin, London, 2, 531—550, 1967.
 43. Штейнберг Д. Ф., Ферштатер Г. Б., Об особенностях химического состава гранитов вулканических и плутонических ассоциаций, ДАН СССР, сер. геол., 182, № 4, 918—921, 1968.
 44. Tauson L. V., Geochemical Behaviour of Rare Elements During Crystallization and Differentiation of Granitic Magmas, Geochim. Int., 4 (6), 1067—1075, 1967.
 45. Tischendorf G., Frieze G., Schindler R., Die Dunkelglimmer der westerzgebirgisch-vogtaländischen Granite (1), Geologie, 18 (4), 384—399, 1969.
 46. Weeks M. A., Discovery of the Elements, 5th Edition, 3, 9—11, 30—32; published by Journal of Chem. Education, Easton, Pa., 1945.
 47. Wood G. A., A Rapid Method for the Determination of Small Amounts of Tin in Soils, Proc. 20th Intntl. Geol. Congress, Symposium on Geochemical Exploration, Mexico, 1956, 461, 1956.
 48. Zalashkova N. Ye., Sitnin A. A., Features of the Distribution of Rare Elements in Tantalum-Bearing Apogranites and Biotite Granites, Geochim. Int., 4 (5), 1013—1025, 1967.
 49. Зильберминц А. В., Элементы-примеси в рудах касситеритово-кварцевого месторождения северо-востока СССР, ДАН СССР, 165, № 1, 1965.

ЭНДОГЕННЫЕ ОРЕОЛЫ РАССЕЯНИЯ ВОКРУГ СУЛЬФИДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ РУДТЖЕБЕКЕН В РАЙОНЕ АДАК, СЕВЕРНАЯ ШВЕЦИЯ

Б. Наирис

Геологическая служба Швеции,
Стокгольм

ВВЕДЕНИЕ

Первичные ореолы рассеяния, ассоциирующие с сульфидными рудами, привлекают все возрастающее внимание в связи с поисками слепых рудных месторождений. Настоящее исследование распределения микроэлементов вокруг сульфидного месторождения Рудтжебекен предпринято с целью выявить и изучить первичные ореолы рассеяния.

Район Адак выбран для проведения геохимических исследований вследствие наличия богатого материала, собранного при геологических, геофизических и буровых работах, выпол-

ненных здесь в больших объемах. Предварительные результаты опубликованы Бротценом и др. [2].

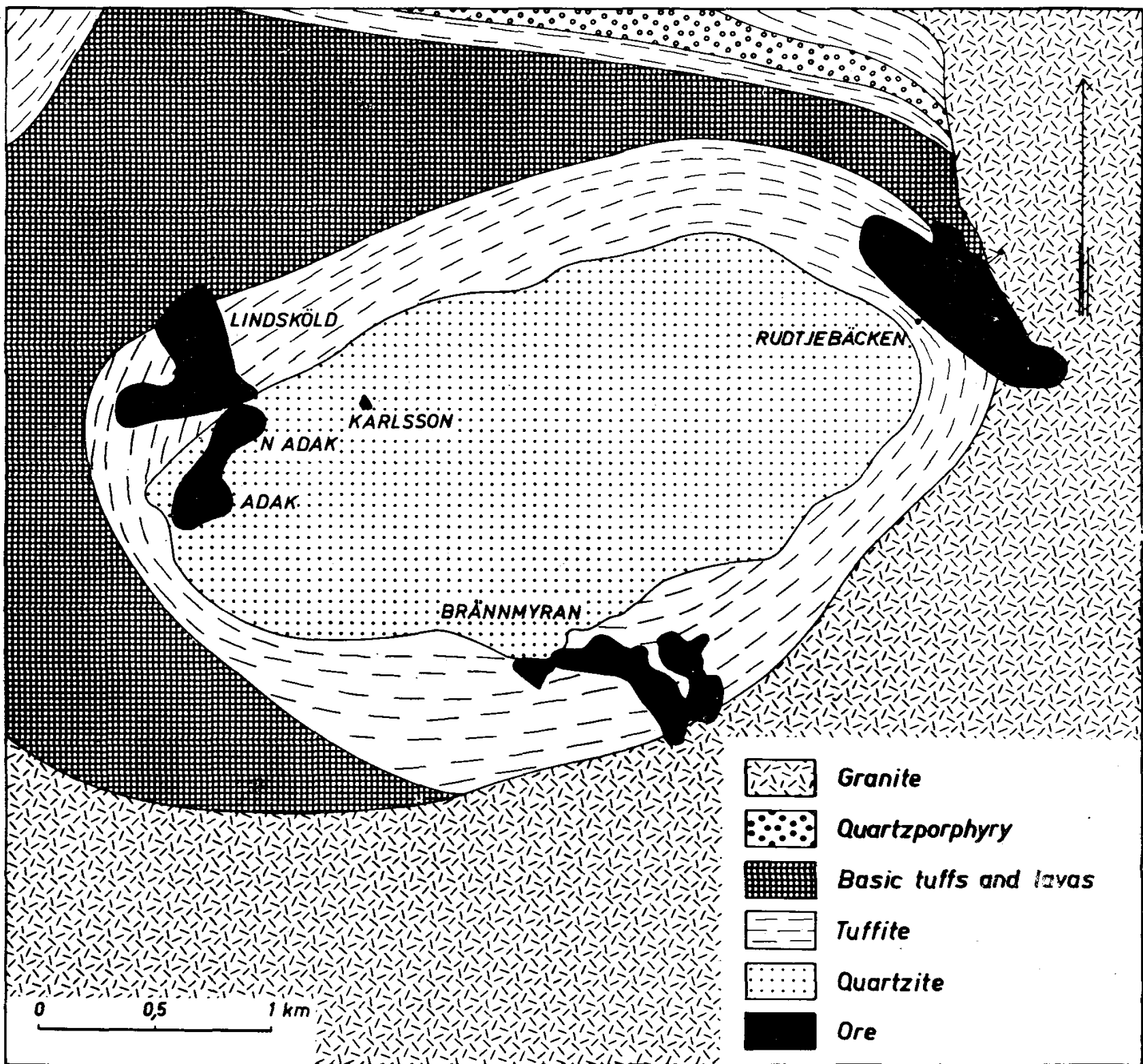
ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ РАЙОНЫ

Рассматриваемая территория находится в северо-западной части сульфидно-рудного района Шелефтео в северной Швеции. Геологическое строение площади описано Хегбомом [12] и Гавелином [8, 9, 10, 11]. Главная структура представлена куполом. Толща пород в пределах указанной структуры характеризуется нормальным залеганием. В основании ее находится

метасоматически переработанная порода — «рудные кварциты», — перекрытая полосчатыми осадочными образованиями туффитового характера. Серия дацит-андезитовых вулканитов, содержащих многочисленные зоны скарнирования, разделяет эти полосчатые туффиты на два горизонта. Выше полосчатых осадочных пород располагается мощная толща андезит-базальтовых вулканитов (представленных в Рудтжебекене уралит-порфирами) и вторая пачка полосчатых туффитов, переслаивающихся с кислыми вулканитами. В верхней части разреза породы

оказаны гранитами Адак, которые считаются самыми молодыми породами района. Эти граниты слагают кровлю купольной структуры и залегают почти согласно с напластованием пород.

В пределах внутренней части купола, в приконтактной зоне «рудных кварцитов» с перекрывающими осадочными породами полосчатой текстуры, локализуется несколько промышленных сульфидных тел — месторождения Карлссон, Линдскёльд, Адак, Рудтжебекен и Бренмиран (фиг. 1). Оруденение описано Гавелином [8] следующим образом:



ФИГ. 1. Геологическая карта района Адак [8] с горизонтальной проекцией рудных тел.

«В минералогическом отношении сульфидное оруденение представлено в большинстве случаев халькопиритом и пирротинном, с которыми, как правило, ассоциируют большие или меньшие количества арсенопирита. Пирит также встречается в подчиненных количествах преимущественно в участках, обедненных халькопиритом. Месторождение Рудтжебекен составляет исключение, поскольку оно представлено плотными рудами, в которых резко преобладает пирит, тогда как пирротин, халькопирит и сфалерит слагают незначительную часть общей массы руды. Выделяются два главных текстурных типа сульфидного оруденения.

1. Руды месторождений Адак и Карлссон представлены сульфидной вкрапленностью, брекчиями, сетью прожилков и небольшими скоплениями плотных сульфидных масс. При этом очертания рудных тел очень неправильные и только в незначительной степени определяются напластованием в куполовидной структуре.

2. Месторождения Линдскёльд, Рудтжебекен и Бренмиран представлены четкими плитоподобными рудными телами. Руды приурочены к приконтактовой зоне массивных «рудных кварцитов» с перекрывающими полосчатыми породами, а рудные тела ориентированы параллельно напластованию в куполе».

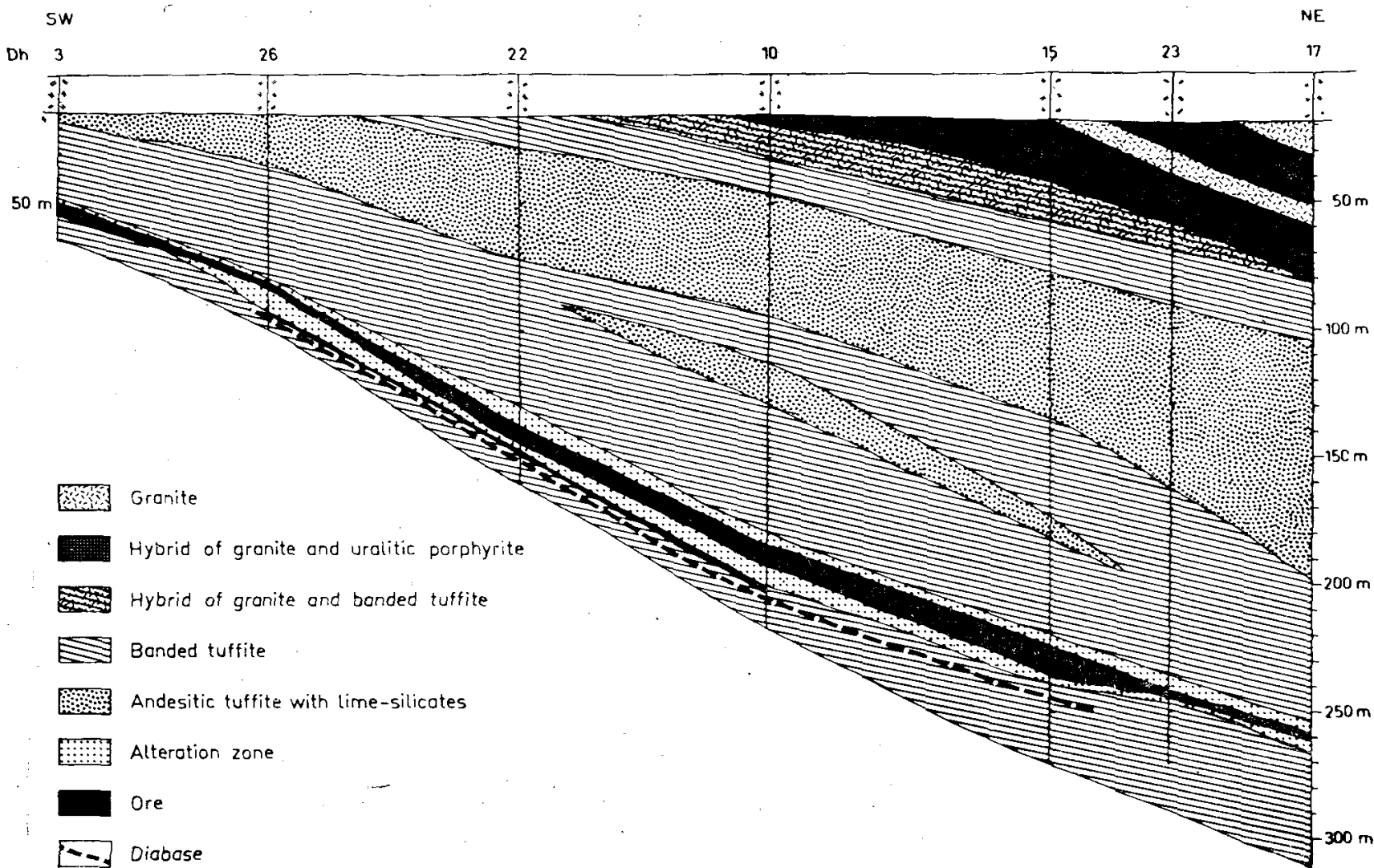
Вертикальный разрез через месторождение Рудтжебекен приводится на фиг. 2. Рудное тело залегает в полосчатых туффитовых породах и полого падает на северо-восток под углом 20°

согласно напластованию в куполе. Вокруг рудного тела отмечается узкая зона окварцевания более крупнозернистого строения. Эта зона измененных пород совершенно не похожа на «рудные кварциты», которые характерны для других рудных тел рассматриваемого района.

Гавелин пришел к выводу, что сульфидные месторождения имеют эпигенетическое происхождение. В некоторых случаях они пересекают крупные плоскостные интрузии основного состава, встречающиеся в районе. Некоторые интрузии представлены силлами, контролирующими структурами напластования купола, другие характеризуются дискордантным залеганием. Местами эти интрузии смещены сбросами, а тесно ассоциирующие с ними рудные жилы не смещены. На руднике Адак установлено, что сульфидная жила пересекает гранитную.

ОПРОВОБОВАНИЕ

На первой стадии исследования опробован керн трех скважин алмазного бурения (3, 10 и 17 на фиг. 2). Предполагалось, что содержа-



ФИГ. 2. Вертикальный разрез через месторождение Рудтжебекен (по Линдберг, не опубликовано). Линия разреза показана на фиг. 1.

ние рудообразующих элементов будет небольшим внутри рудной зоны и около нее; кроме того, считалось, что с увеличением расстояния от рудного тела оно будет быстро убывать, пока, наконец, не достигнет постоянного уровня, или фона. Соответственно этому и была принята схема предварительного опробования. Вблизи рудного тела пробы пород брались на небольшом расстоянии друг от друга, а по мере удаления от последнего шаг опробования увеличивался.

При опробовании участков с разными типами пород брались пробы, состоящие из трех кусочков длиной по 10 см и шириной 3,3 см, отколотых от керна с интервалом по длине 1 м. Позже, после первоначальных химических анализов, было установлено, что удобнее объединять соседние пробы (3 × 3) так, чтобы каждая представляла интервал 3 м. Брались также дополнительные пробы между наиболее удаленными, если требовались дополнительные данные для выяснения тенденции изменения содержания элементов. Керн скважин № 15, 22, 23 и 26 указанного разреза опробовался по обычной схеме, при этом каждая проба представляла интервал 5 м и состояла из пяти образцов керна длиной по 10 см (один образец с интервалом 1 м). Всего была взята 241 проба.

АНАЛИТИЧЕСКАЯ МЕТОДИКА

Аналитические работы проводились в химической лаборатории геологической службы Швеции. Все пробы дробились и растирались, часть каждой пробы использовалась для приготовления буфера и при помощи спектрометра с прямым отсчетом, снабженного печатающим устройством, анализировалась количественно на элементы Mg, Ca, Ti, V, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Mo, Ag, Sn, Ba, Pb и Bi. Другая часть пробы обрабатывалась соляной и азотной кислотами, а экстрагированные металлы осаждались в виде сульфидов сероводородом [5]. Осадок количественно анализировался на спектрометре с определением Cu, Zn, As, Mo, Ag, Pb, Sn и Bi. Этот метод «совместного выделения сульфидов» использовался для повышения чувствительности анализа на указанные элементы. Таким образом, относительные количества меди и цинка определялись двумя способами. В первом случае устанавливались общие содержания элементов, а во втором — только количества элементов, находящихся в растворимой форме (по отношению к кислоте). Результаты обоих методов довольно хорошо соответствуют друг другу.

СТАТИСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

Для изучения взаимно корреляционных связей между геохимическими переменными и тем самым для объяснения наблюдаемых соотношений между многочисленными переменными в виде более простых зависимостей использовался R-метод факторного анализа. Этот метод с программой описан Камероном [3].

Поскольку семь буровых скважин с опробованным керном располагаются на одной линии, простирающейся с юго-запада на северо-восток, и образуют вертикальный разрез через рудное тело, геохимические данные могут быть обработаны путем анализа двумерной поверхности тренда. При этом использовалась программа анализа поверхности тренда KWIKR-8 [6] и вычислялись значения факторов для входных данных. Хотя вычислялись поверхности вплоть до седьмого порядка, полная поверхность четвертого порядка обычно характеризуется лучшим приближением и дает наиболее наглядную картину общего распределения факторов, вследствие чего именно эта поверхность и использовалась для рассмотрения отдельных факторов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ГЕОХИМИЧЕСКОЙ РЕКОГНОСЦИРОВКИ

Первоначальное рассмотрение результатов химического анализа показало, что для рудной зоны характерны наиболее высокие содержания Cu, Pb, Zn, Ag, As, Mo, Bi, Sn и Fe, причем они быстро уменьшаются по мере удаления от рудного тела. В большинстве случаев содержания металлов уменьшаются быстрее в лежащем боку рудной зоны, причем такое снижение содержания особенно характерно для меди. В висшем боку рудной зоны существуют дополнительные зоны с относительно высокими концентрациями халькофильных элементов.

Изменения содержаний других элементов — Mg, Ca, Ti, V, Mn, Co, Ni и Ba, — по-видимому, соответствуют изменениям литологического состава вмещающих пород.

РЕЗУЛЬТАТЫ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Средние содержания элементов и стандартные отклонения по 241 пробе, а также средние значения логарифмов содержаний и их стандартные отклонения приводятся в табл. I. Как и ожидалось, все рудообразующие элементы, а также ассоциирующие с ними элементы характеризуются очень большой дисперсией,

Таблица I

Статистические данные, Рудтжебекен, 241 проба

	Среднее	Стандартное отклонение	Среднее (\bar{x}_{\log})	Стандартное отклонение	Среднее геометрическое, G (antilog \bar{x}_{\log})
Cu	415	1140	2,03	0,588	110
Pb	730	295	1,19	0,637	15
Zn	1050	4190	2,18	0,601	150
Sn	2,3	5,4	0,13	0,355	1,3
Bi	0,8	1,2	-0,34	0,429	0,5
Ag	1,0	2,5	-0,393	0,477	0,4
Mo	2,7	2,6	0,277	0,350	1,9
As	55	180	1,06	0,695	11
Fe	6,5	4,6	0,755	0,193	5,7
Mg	2,45	1,10	0,352	0,181	2,2
Ti	0,71	0,36	-0,206	0,247	0,62
Ca	6,99	3,78	0,797	0,201	6,27
Mn	0,10	0,03	-1,02	0,180	0,9
Ba	0,036	0,016	-1,5	0,246	0,032
V	290	121	2,40	0,283	250
Co	29	13	1,43	0,174	27
Ni	20	32	1,02	0,445	10

Таблица II

Статистические данные, Рудтжебекен, 219 проб (пробы из рудных тел исключены)

	Среднее	Стандартное отклонение	Среднее (\bar{x}_{\log})	Стандартное отклонение	Среднее геометрическое, G (antilog \bar{x}_{\log})
Cu	110	159	1,89	0,383	80
Pb	30,5	60,6	1,09	0,538	12
Zn	150	244	2,02	0,323	100
Sn	1,3	0,67	0,0505	0,238	1,1
Bi	0,6	0,72	-0,418	0,360	0,4
Ag	0,5	0,45	-0,469	0,342	0,3
Mo	2,1	1,66	0,217	0,302	1,6
As	27	80,5	0,951	0,600	9
Fe	5,4	1,52	0,717	0,134	5,2
Mg	2,40	0,97	0,348	0,173	2,23
Ti	0,75	0,35	-0,162	0,172	0,69
Ca	7,19	3,79	0,814	0,185	6,52
Mn	0,11	0,031	-0,996	0,138	0,10
Ba	0,038	0,015	-1,47	0,207	0,034
V	306	112	2,45	0,204	280
Co	28	10	1,43	0,160	27
Ni	20	33	1,00	0,453	10

их коэффициенты вариации для преобразованных данных близки к 100% или даже выше. Элементы, являющиеся компонентами пород

Таблица III

Рудтжебекен, \bar{x} (среднее) и G (антилогарифм \bar{x}_{\log}), выраженные в кларках концентрации

	Кларки	241 проба, включая рудные пробы		219 проб без рудных проб	
		\bar{x}	G	\bar{x}	G
Cu	47 млн ⁻¹ (B)	8,83	2,34	2,34	1,70
Pb	16 млн ⁻¹ (B)	45,6	0,94	1,91	0,75
Zn	83 млн ⁻¹ (B)	12,65	1,80	1,80	1,20
Sn	2,5 млн ⁻¹ (B)	0,92	0,52	0,52	0,44
Bi	0,009 (B)	(4)	(2,5)	(3)	(2)
Ag	0,10 млн ⁻¹ (B)	10	4	5	3
Mo	1,1 млн ⁻¹ (B)	2,45	1,73	1,91	1,45
As	1,7 млн ⁻¹ (B)	32	6,47	15,88	5,29
Fe	4,65% (B)	1,40	1,23	1,16	1,12
Mg	1,87% (B)	1,31	1,18	1,28	1,19
Ti	0,45% (B)	1,58	1,38	1,67	1,53
Ca	2,96% (B)	2,36	2,12	2,43	2,20
Mn	0,11% (B)	0,91	0,82	1,00	1,00
Ba	0,065% (B)	0,55	0,49	0,58	0,52
V	90 млн ⁻¹ (B)	3,22	2,78	3,40	3,11
Co	18 млн ⁻¹ (B)	1,61	1,50	1,56	1,50
Ni	58 млн ⁻¹ (B)	0,34	0,17	0,34	0,17

B - Виноградов [14].
Б - Бойл [1].

различных типов, отличаются гораздо меньшими, но довольно высокими значениями коэффициентов вариации, так, для Mn установлен минимальный коэффициент вариации, равный 30%. В табл. II приводятся те же статистические параметры, что и в табл. I, но только по 219 пробам; пробы из рудных тел исключены. Рудообразующие элементы в этой таблице также характеризуются очень большой дисперсией. Сравнение средних содержаний и средних значений преобразованных данных по двум группам проб (с учетом и без учета проб из рудных тел) со средними содержаниями тех же элементов в земной коре дается в табл. III. Как видно из табл. III, As, Pb, Zn, Ag и Cu в значительной мере концентрируются в рудном теле, а также встречаются в повышенных количествах за пределами рудной зоны. Высокое содержание As типично для многих пород и руд района Шелефтео.

Вследствие большой изменчивости содержания элементов при факторном анализе использовались десятичные логарифмы этих значений.

Выявление корреляционных связей между переменными величинами является первым этапом факторного анализа. Коэффициенты корреляции для каждой пары переменных приводятся в табл. IV. Из полученных данных видно, что сильная положительная корреляционная

Таблица IV

Рудтжебекен, скважины 3, 10, 15, 17, 22, 23 и 26; матрица корреляций по 241 пробе (логарифмическое преобразование)

	Cu	Pb	Zn	Sn	Bi	Ag	Mo	As	Fe	Mg	Ti	Ca	Mn	Ba	V	Co	Ni
Cu	1,00	0,55	0,76	0,67	0,61	0,76	0,69	0,48	0,70	0,04	-0,40	-0,29	-0,34	-0,30	-0,39	0,06	-0,06
Pb	0,55	1,00	0,73	0,58	0,66	0,74	0,57	0,56	0,33	-0,12	-0,27	-0,40	-0,35	0,04	-0,40	-0,25	-0,07
Zn	0,76	0,73	1,00	0,82	0,69	0,84	0,68	0,58	0,69	-0,03	-0,49	-0,48	-0,45	-0,21	-0,47	-0,07	0,14
Sn	0,67	0,58	0,82	1,00	0,71	0,79	0,70	0,54	0,61	-0,14	-0,46	-0,40	-0,42	-0,21	-0,50	-0,01	0,09
Bi	0,61	0,66	0,69	0,71	1,00	0,76	0,67	0,50	0,50	-0,03	-0,31	-0,36	-0,27	-0,10	-0,40	-0,09	0,01
Ag	0,76	0,74	0,84	0,79	0,76	1,00	0,71	0,56	0,60	0,02	-0,30	-0,38	-0,37	-0,11	-0,40	-0,01	0,06
Mo	0,69	0,57	0,68	0,70	0,67	0,71	1,00	0,59	0,51	-0,14	-0,28	-0,41	-0,33	-0,09	-0,45	-0,12	-0,02
As	0,48	0,56	0,58	0,54	0,50	0,56	0,59	1,00	0,33	-0,18	-0,32	-0,22	-0,28	-0,10	-0,41	-0,13	0,13
Fe	0,70	0,33	0,69	0,61	0,50	0,60	0,51	0,33	1,00	0,14	-0,29	-0,29	-0,21	-0,30	-0,18	0,53	0,08
Mg	-0,04	-0,11	-0,03	-0,14	-0,03	0,02	-0,14	-0,18	0,14	1,00	0,15	0,14	0,15	-0,19	0,28	0,56	0,48
Ti	-0,40	-0,27	-0,49	-0,46	-0,31	-0,30	-0,28	-0,32	-0,29	0,15	1,00	0,22	0,43	0,52	0,44	0,00	-0,07
Ca	-0,29	-0,40	-0,48	-0,40	-0,36	-0,38	-0,41	-0,22	-0,29	0,14	0,22	1,00	0,52	-0,10	0,25	0,13	-0,07
Mn	-0,34	-0,35	-0,48	-0,42	-0,27	-0,37	-0,33	-0,28	-0,21	0,15	0,43	0,52	1,00	0,13	0,32	0,10	-0,14
Ba	-0,30	0,04	-0,21	-0,21	-0,10	-0,11	-0,09	-0,10	-0,30	-0,19	0,52	-0,10	0,13	1,00	0,26	-0,26	-0,03
V	-0,39	-0,40	-0,47	-0,59	-0,40	-0,40	-0,45	-0,41	-0,18	0,28	0,44	0,25	0,32	0,26	1,00	0,39	0,19
Co	0,06	-0,25	0,07	-0,01	-0,09	-0,01	-0,12	-0,13	0,53	0,56	0,00	0,13	0,10	-0,26	0,39	1,00	0,46
Ni	-0,06	-0,07	0,14	0,09	0,01	0,06	-0,02	0,13	0,08	0,48	-0,07	-0,07	-0,14	-0,03	0,19	0,46	1,00

Таблица V

Общая дисперсия

Номер фактора	Собственное значение	Доля дисперсии фактора, %	Сумма дисперсии факторов, %
1	7,14	42,0	42,0
2	2,47	14,5	56,5
3	1,50	8,8	65,3
4	1,25	7,4	72,7
5	0,90	5,3	78,0
6	0,67	4,0	82,0
7	0,52	3,0	85,0
8	0,46	2,7	87,7
9	0,42	2,4	90,2
10	0,39	2,3	92,5
11	0,31	1,8	94,3
12	0,26	1,6	95,8
13	0,23	1,3	97,1
14	0,19	1,1	98,3
15	0,12	0,7	99,0
16	0,10	0,6	99,6
17	0,07	0,4	100,0

связь существует между всеми рудообразующими элементами: Cu, Pb, Zn, Bi, Ag, Mo, As и Fe.

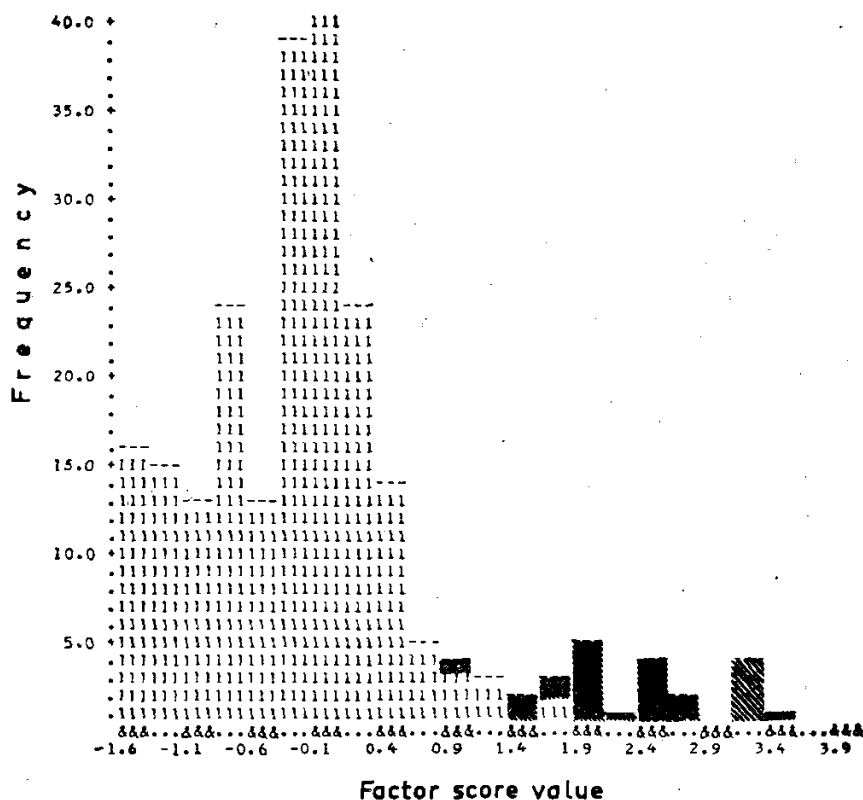
При решении задачи с помощью факторного анализа число факторов было ограничено величинами собственных значений и возможностью интерпретации факторов применительно к локальной геохимии. В табл. V дается величина дисперсии каждого фактора и ее доля в общей дисперсии, выраженная в процентах.

В рассматриваемом случае была выбрана модель с 15 факторами. Поскольку природные процессы редко являются взаимоисключающими, некоторая коррелированность вводится и в систему факторов при вычислении вкладов

или нагрузок каждого элемента на каждый фактор. Поэтому преобразование вращением в косоугольных координатах с помощью программы Pгомах (KMIN-2) [3, 7] производилось после преобразования вращением по методу «изменения максимума» Varimax.

В табл. VIa приводятся оценки факторов, полученные с помощью Varimax, а в табл. VIб — результаты решения методом Pгомах.

Фактор 1 (Ag, Zn, Cu, Bi, Pb, Mo, Fe, As). Гистограмма значений фактора, где особо выделены значения, относящиеся к рудным пробам, приводится на фиг. 3. Поскольку



ФИГ. 3. Гистограмма значений фактора — фактор 1. Рудные пробы исключены. По вертикальной оси — частота, по горизонтальной — значения фактора.

Таблица VIa

Рудтжебекен, скважины 3, 10, 15, 22, 23 и 26; матрица Varimax; при ограничении 99,0% общей дисперсии (логарифмическое преобразование)

Фактор	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Сумма квадратов	4,66	1,46	1,09	1,04	1,02	1,06	1,03	0,53	1,10	0,59	1,01	1,11	0,59	0,39	0,17
0,99 Cu	0,73	0,15	-0,15	-0,12	0,14	0,08	-0,09	0,04	-0,05	0,18	-0,14	-0,12	0,03	0,55	-0,03
0,99 Pb	0,63	-0,13	0,08	-0,12	0,22	-0,01	-0,10	0,12	-0,15	0,06	-0,07	-0,08	0,67	0,01	-0,01
0,94 Zn	0,79	0,19	-0,07	-0,13	0,17	-0,04	-0,18	0,02	-0,22	0,05	-0,21	0,11	0,26	0,12	0,07
0,99 Sn	0,83	0,09	-0,09	-0,14	0,13	-0,12	-0,19	0,10	-0,12	0,12	-0,17	0,07	-0,05	-0,09	0,34
1,00 Bi	0,68	0,01	-0,02	-0,04	0,14	0,01	-0,11	0,67	-0,12	0,13	-0,08	-0,01	0,12	0,02	0,01
1,00 Ag	0,93	0,04	-0,01	-0,12	0,16	0,06	-0,09	0,09	-0,10	0,08	-0,03	0,00	0,10	-0,01	-0,21
1,00 Mo	0,61	0,02	-0,02	-0,08	0,23	-0,07	-0,15	0,12	-0,16	0,69	-0,04	-0,03	0,05	0,09	0,01
1,00 As	0,40	-0,02	-0,03	-0,07	0,87	-0,10	-0,14	0,07	-0,04	0,12	-0,09	0,10	0,11	0,04	0,01
0,97 Fe	0,56	0,73	-0,13	-0,03	0,08	0,01	-0,06	0,09	-0,15	0,08	-0,06	-0,06	0,01	0,22	0,08
1,00 Mg	-0,00	0,21	-0,10	0,07	-0,09	0,92	0,10	0,01	0,06	-0,03	0,08	0,26	-0,00	0,02	-0,01
1,00 Ti	-0,22	-0,04	0,30	0,18	-0,09	0,09	0,16	-0,04	0,07	-0,02	0,88	-0,04	-0,04	-0,04	-0,01
1,00 Ca	-0,25	0,00	-0,08	0,23	-0,03	0,06	0,07	-0,05	0,92	-0,08	0,06	-0,03	-0,07	-0,02	-0,01
1,00 Mn	-0,22	0,02	0,05	0,91	-0,07	0,07	0,10	-0,02	0,24	-0,04	0,17	-0,08	-0,06	-0,03	-0,01
1,00 Ba	-0,08	-0,15	0,94	0,05	-0,02	-0,10	0,11	-0,01	-0,08	-0,01	0,23	0,01	0,03	-0,04	-0,01
1,00 V	-0,29	0,15	0,14	0,11	-0,14	0,12	0,88	-0,06	0,08	-0,08	0,17	0,11	-0,06	-0,03	-0,01
0,98 Co	-0,01	0,85	-0,13	0,04	-0,07	0,29	0,21	-0,05	0,09	-0,03	-0,01	0,27	-0,07	-0,07	-0,04
1,00 Ni	0,02	0,15	0,01	-0,08	0,08	0,23	0,08	-0,00	-0,04	-0,01	-0,04	0,95	-0,03	-0,03	0,01

Таблица VIб

Рудтжебекен, скважины 3, 10, 15, 17, 22, 23 и 26; матрица после деортогонализирующего вращения по методу Rгомах; коэффициент KMIN-2 (логарифмическое преобразование)

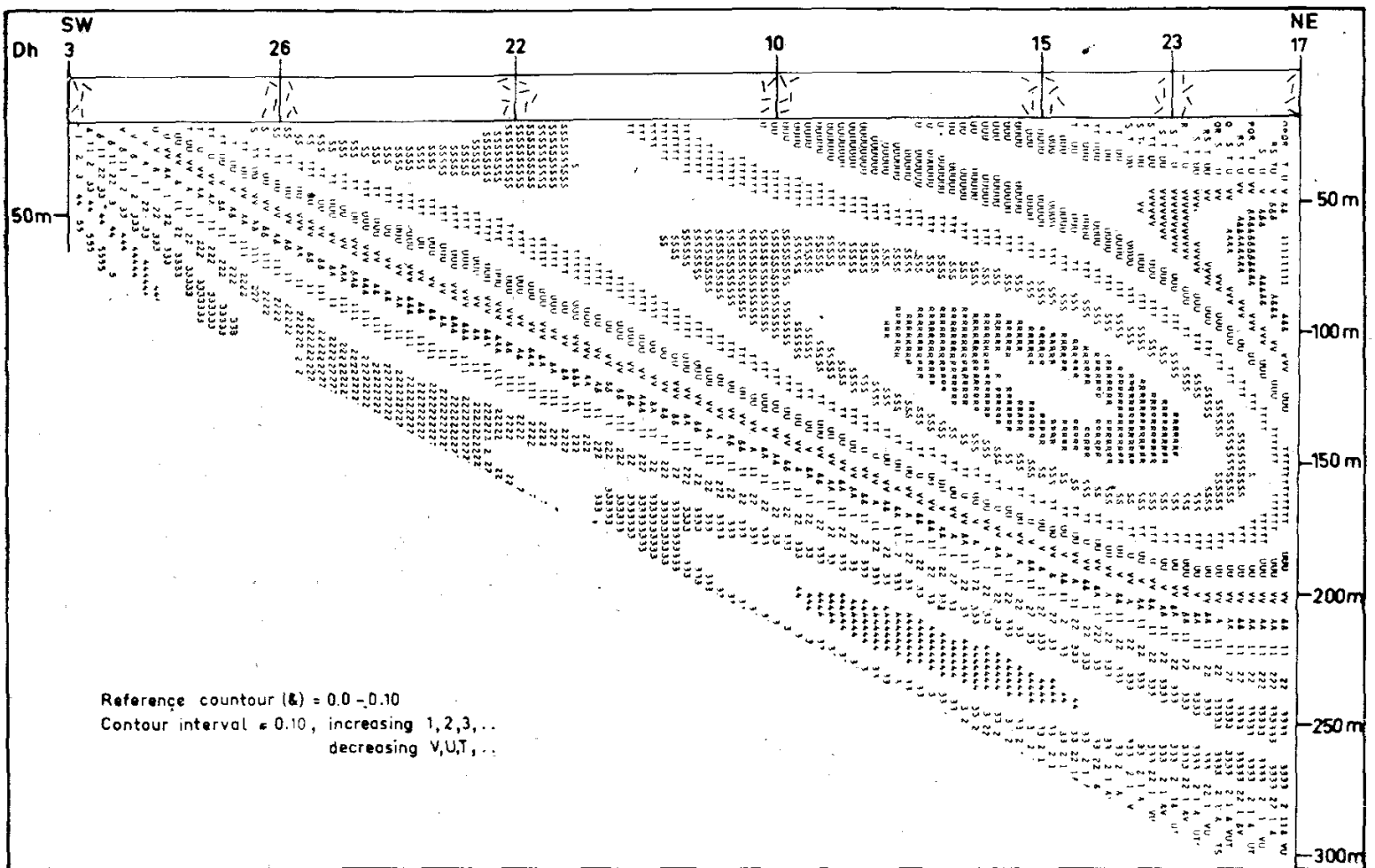
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Cu	0,41	0,00	-0,03	0,02	0,01	0,01	-0,01	-0,01	0,03	0,04	-0,01	0,03	-0,55	0,02	-0,03
Pb	0,33	0,05	0,01	-0,03	0,05	-0,01	-0,00	0,03	0,00	0,02	-0,05	-0,01	0,03	-0,59	-0,02
Zn	0,51	-0,11	-0,01	-0,01	0,02	0,02	0,06	-0,08	-0,08	-0,02	0,06	0,08	-0,08	-0,22	0,05
Sn	0,64	0,03	-0,01	0,03	0,01	0,00	0,01	-0,01	0,02	0,03	-0,03	0,03	0,07	0,05	0,29
Bi	0,37	-0,01	-0,00	-0,00	0,02	0,00	0,02	-0,02	-0,02	0,02	-0,61	0,01	-0,01	-0,04	0,00
Ag	0,72	-0,00	0,01	0,02	0,04	-0,00	0,01	0,03	-0,02	0,01	-0,03	-0,01	-0,03	-0,01	-0,23
Mo	0,31	-0,01	-0,00	0,00	0,06	0,01	0,03	-0,00	-0,03	0,60	-0,02	0,00	-0,03	-0,01	0,01
As	0,13	0,00	-0,00	0,01	0,73	0,01	0,02	-0,01	0,00	0,02	-0,01	0,01	0,00	-0,02	-0,00
Fe	0,30	-0,55	0,01	-0,00	0,03	0,01	0,03	0,08	-0,06	0,00	-0,04	-0,03	-0,17	-0,00	0,10
Mg	-0,00	-0,05	-0,01	-0,01	-0,01	-0,72	-0,01	-0,06	-0,00	-0,00	0,00	-0,01	-0,01	-0,01	0,01
Ti	-0,05	-0,00	0,07	-0,03	-0,01	-0,01	-0,03	-0,01	-0,01	-0,00	0,01	-0,72	0,01	-0,01	-0,00
Ca	-0,06	-0,01	-0,00	-0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,80	-0,01	0,01	-0,01	-0,02	-0,01	0,01
Mn	-0,04	0,01	0,00	-0,79	-0,01	-0,01	-0,01	0,01	0,06	-0,00	-0,00	-0,03	0,01	0,01	-0,01
Ba	-0,01	0,02	0,76	-0,00	-0,00	0,01	-0,01	-0,00	-0,00	0,00	0,00	-0,05	0,01	0,00	-0,00
V	-0,07	-0,03	0,02	-0,01	-0,02	-0,01	-0,74	-0,01	-0,00	-0,01	0,01	-0,03	-0,01	-0,01	0,01
Co	-0,01	-0,69	-0,03	0,01	-0,02	-0,08	-0,07	-0,11	0,05	0,01	0,01	0,02	0,09	0,04	-0,06
Ni	0,01	-0,02	0,01	0,01	0,01	-0,05	-0,00	-0,77	-0,01	0,00	-0,01	-0,01	-0,01	0,01	0,01

все самые высокие значения, за исключением одного, относятся к рудным пробам, данный фактор может считаться рудным. Все элементы, ассоциирующие с рудой, находятся под влиянием этого фактора, и именно им вызывается большая часть общей изменчивости, причем наибольшее влияние оказывается на Ag и Sn.

Поверхность тренда четвертого порядка, изображенная на фиг. 4, имеет достаточно хорошее приближение (33%) и характеризует общий тренд фактора. В рудной зоне значения фактора фиксируют заметный общий максимум, который подразделяется на два меньших максимума. Один из них приурочен к высоко-сортной руде, а другой — к верхней юго-западной части рудного тела. Величины значений фактора быстро уменьшаются по мере уда-

ления от рудной зоны, при этом в лежащем боку они уменьшаются быстрее, чем в висячем боку. Заметный минимум отмечается в андезитовых породах, а слабый максимум — над ними, в верхней пачке полосчатых туффитов.

Как видно из матрицы факторных нагрузок, элементы, находящиеся под влиянием рудного фактора, также связаны с другими факторами, которые в свою очередь могут отражать специфику поведения элементов, слагающих ореол. Чтобы проверить такое возможное объяснение, рудные пробы были исключены, а оставшиеся 219 проб обработаны методом факторного анализа аналогичным образом. Полученная по методу Rгомах матрица факторных нагрузок приводится в табл. VII. При сравнении обеих матриц видно их хорошее соответствие, а решения методом факторного анализа



ФИГ. 4. Поверхность тренда факторных значений четвертого порядка — фактор 1 (Ag, Sn, Zn, Cu, Bi, Pb, Mo, Fe, As), точность приближения 33%.
 На фигуре (сверху — вниз): исходная изолиния 0,0 — 0,10; интервал между изолиниями 0,10; увеличение 1, 2, 3, ... уменьшение — V, U, T, ...

Таблица VII

Рудтжебекен, скважины 3, 10, 15, 17, 22, 23 и 26; без рудных проб;
 матрица после деортогонализирующего вращения по методу Ргомах; коэффициент KMIN-2
 (логарифмическое преобразование)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Cu	-0,00	0,00	0,01	0,78	-0,00	-0,00	-0,02	0,00	-0,05	0,03	0,00	-0,01	-0,00	-0,02	0,02	0,00
Pb	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	-0,03	-0,74	-0,00	0,00	0,01	-0,01	-0,04	-0,01	0,02	0,01	-0,00
Zn	0,05	-0,00	0,01	0,02	0,01	-0,02	-0,30	0,00	-0,02	0,02	-0,00	-0,03	0,01	0,05	0,06	-0,52
Sn	0,74	0,00	0,01	-0,00	0,00	-0,01	-0,03	0,00	-0,01	0,03	-0,01	-0,05	0,01	-0,01	0,02	-0,01
Bi	0,06	0,00	0,00	0,01	0,01	-0,01	-0,06	-0,00	-0,01	0,03	-0,00	-0,73	0,01	0,01	0,02	-0,01
Ag	0,10	-0,00	0,00	0,07	0,02	-0,02	-0,13	0,02	-0,01	0,04	-0,01	-0,08	-0,01	0,02	0,55	-0,03
Mo	0,05	0,00	0,00	0,06	0,01	-0,05	-0,03	0,01	-0,00	0,69	-0,01	-0,04	-0,00	0,01	0,02	-0,01
As	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	-0,83	-0,03	-0,00	-0,00	0,02	-0,01	-0,01	0,01	-0,01	0,01	-0,00
Fe	0,04	0,01	-0,07	0,11	0,02	-0,01	-0,01	0,07	-0,67	0,01	0,01	-0,03	-0,07	0,08	-0,02	-0,02
Mg	0,00	-0,66	-0,02	0,01	-0,01	0,01	-0,00	0,01	-0,01	-0,00	0,08	-0,00	0,09	0,02	-0,01	-0,00
Ti	0,00	-0,01	0,00	-0,00	0,02	0,00	0,00	0,84	-0,05	0,00	0,01	0,00	0,01	-0,01	0,01	0,00
Ca	0,01	0,00	-0,10	0,02	-0,02	-0,01	0,03	0,00	0,03	-0,01	-0,01	0,00	-0,02	-0,75	-0,01	0,00
Mn	-0,01	-0,01	-0,79	-0,01	-0,01	0,00	0,01	-0,00	-0,04	-0,00	0,01	0,00	0,01	-0,08	0,00	0,00
Ba	0,00	0,01	0,01	-0,00	0,84	-0,00	-0,01	0,02	-0,00	0,01	0,00	-0,00	0,01	0,02	0,00	-0,00
V	-0,00	-0,04	-0,02	0,02	0,01	0,00	0,00	0,01	-0,01	-0,01	0,75	-0,01	0,00	0,03	-0,01	-0,00
Co	-0,05	-0,14	0,04	-0,06	-0,03	0,03	0,03	0,01	-0,44	-0,02	0,23	0,03	0,17	-0,14	0,03	0,02
Ni	0,01	-0,05	-0,01	0,00	0,01	-0,01	0,00	0,01	0,02	0,00	0,02	-0,01	0,76	0,03	-0,01	-0,01

приводят почти к одинаковым значениям факторов. Однако описанный выше рудный фактор уменьшился только в отношении нагрузки на Sn и Ag. Для проверки стабильности факторов в обеих совокупностях проб, включая и исключая рудные пробы, каждая из них была разделена на две группы при помощи таблицы случайных чисел. Полученные четыре группы обрабатывались путем факторного анализа таким же образом, как и раньше. Установлено, что факторы стабильны, хотя влияние факторов на Zn несколько меняется.

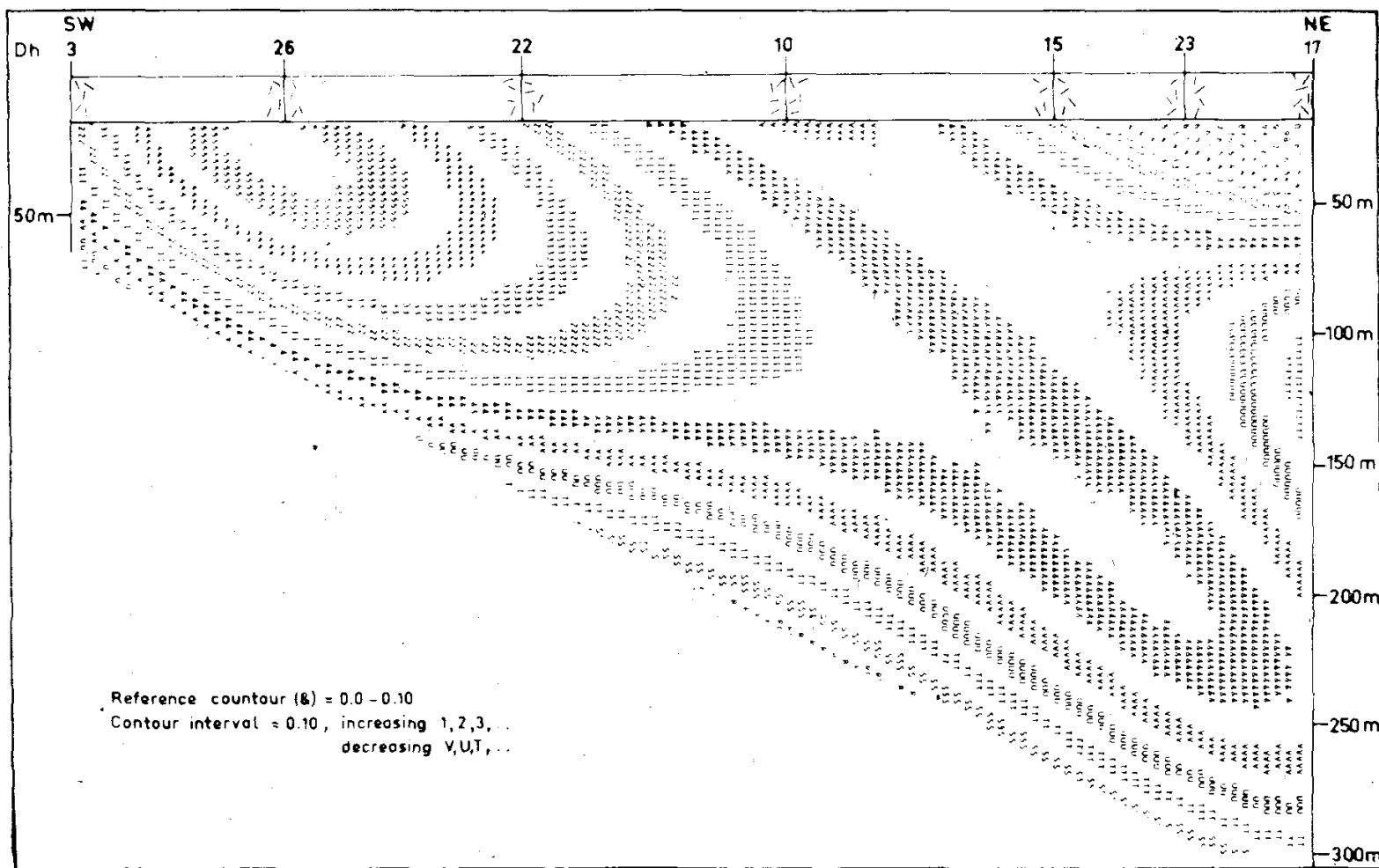
Как правило, точность приближения и характер поверхности тренда факторов, полученные по совокупности, в которой содержатся рудные пробы, очень близки к соответствующим факторам совокупности, из которой рудные пробы исключены. При дальнейшем обсуждении в случае отсутствия особых оговорок рассматриваемые результаты будут относиться к совокупности, включающей рудные пробы.

Фактор 2 (Co, Fe, Zn). Высокие содержания Co, Fe и Zn приводят к отрицательным значениям факторов вследствие отрицательных факторных нагрузок этих элементов. Наиболее высокие отрицательные значения установлены в рудных интервалах, особенно в их богатых частях, в зеленокаменных уралитовых порфи-

ритах и полосчатых туффитах, преимущественно в участках, расположенных под рудным телом. Фактор Fe — Co характеризуется той же тенденцией и в случае, когда рудные пробы исключены. Большие значения факторов в высокосортной руде, вероятно, обусловлены существенно пиритовым составом руды. Рассматриваемый фактор, по-видимому, находится в зависимости от литологического состава пород, представленных железо-магнезиальными полосчатыми туффитами и зеленокаменными породами. Несмотря на его довольно плохую точность приближения (21%), поверхность тренда характеризуется хорошим соответствием с указанными геологическими образованиями (фиг. 5).

Фактор 3 (Ba) показывает распределение Ba. Большие значения, соответствующие высоким содержаниям Ba, установлены в зеленокаменных породах и гранитах Адак. Слабая тенденция к появлению довольно высоких значений отмечается в полосчатых туффитах, окружающих рудное тело. Само рудное тело отличается в основном содержанием очень малых количеств Ba. Характер распределения Ba хорошо иллюстрируется поверхностью тренда.

Фактор 4 (Mn) не дает какой-либо дополнительной информации к информации о распределении Mn по исходным данным. Высокие



ФИГ. 5. Поверхность тренда факторных значений четвертого порядка — фактор 2 (Co, Fe, Zn), точность приближения 21%.

содержания Mn приводят к большим отрицательным значениям фактора, которые установлены в скарновых зонах среди туффитов, а также в нижней пачке полосчатых туффитов, особенно в надрудной части. Поверхность тренда четвертого порядка с точностью приближения 13% недостаточно четко показывает характер распределения Mn. Поверхность тренда пятого порядка имеет точность приближения 26%, но она не может быть воспроизведена в настоящей статье по техническим причинам.

Фактор 5 (As) связан с рудным фактором (фактор 1) и дополняет его. Наиболее высокие значения описываемого фактора установлены в рудных интервалах и пробах, взятых вблизи рудной зоны, особенно в висячем боку богатой руды и нижнем северо-восточном участке. Высокие значения характерны также для двух зон, параллельных рудному телу, при этом одна располагается примерно в 50 м над рудной зоной на контакте полосчатых туффитов и андезитов, а другая — в зоне развития кварц-полевошпатовых прожилков в верхней пачке полосчатых туффитов, где значения фактора резко возрастают по мере приближения к поверхности. Характер распределения иллюстрируется поверхностью тренда (фиг. 6) с приближением 22%.

Фактор 6 (Mg, Co) преимущественно отражает поведение Mg и в значительно меньшей степени — поведение Co. Самые большие отрицательные значения, связанные с высокими содержаниями Mg, установлены в зеленокаменных породах и рудных интервалах скважин № 3 и 26. Участок полосчатых туффитов, находящийся под рудным телом на глубоких горизонтах рассматриваемого профиля, также отличается большими отрицательными значениями. Кроме того, андезитовые породы и верхняя пачка полосчатых туффитов характеризуются содержаниями больших количеств Mg. Поверхность тренда имеет хорошее приближение (29%) и дает общую картину распределения фактора.

Фактор 7 (V) отражает только распределение V, его отрицательные значения относятся к высоким содержаниям V. Наиболее примечательная особенность распределения ванадия заключается в его очень низких содержаниях в рудной зоне. Самые большие отрицательные значения установлены в полосчатых туффитах под рудной зоной и совпадают с таковыми для Co — Fe — Zn. Повышенные отрицательные значения отмечаются в зеленокаменных породах, но, как видно по поверхности тренда четвертого порядка с наилучшей точностью приближения (13%), V довольно равномерно распределен в различных типах пород (фиг. 7).

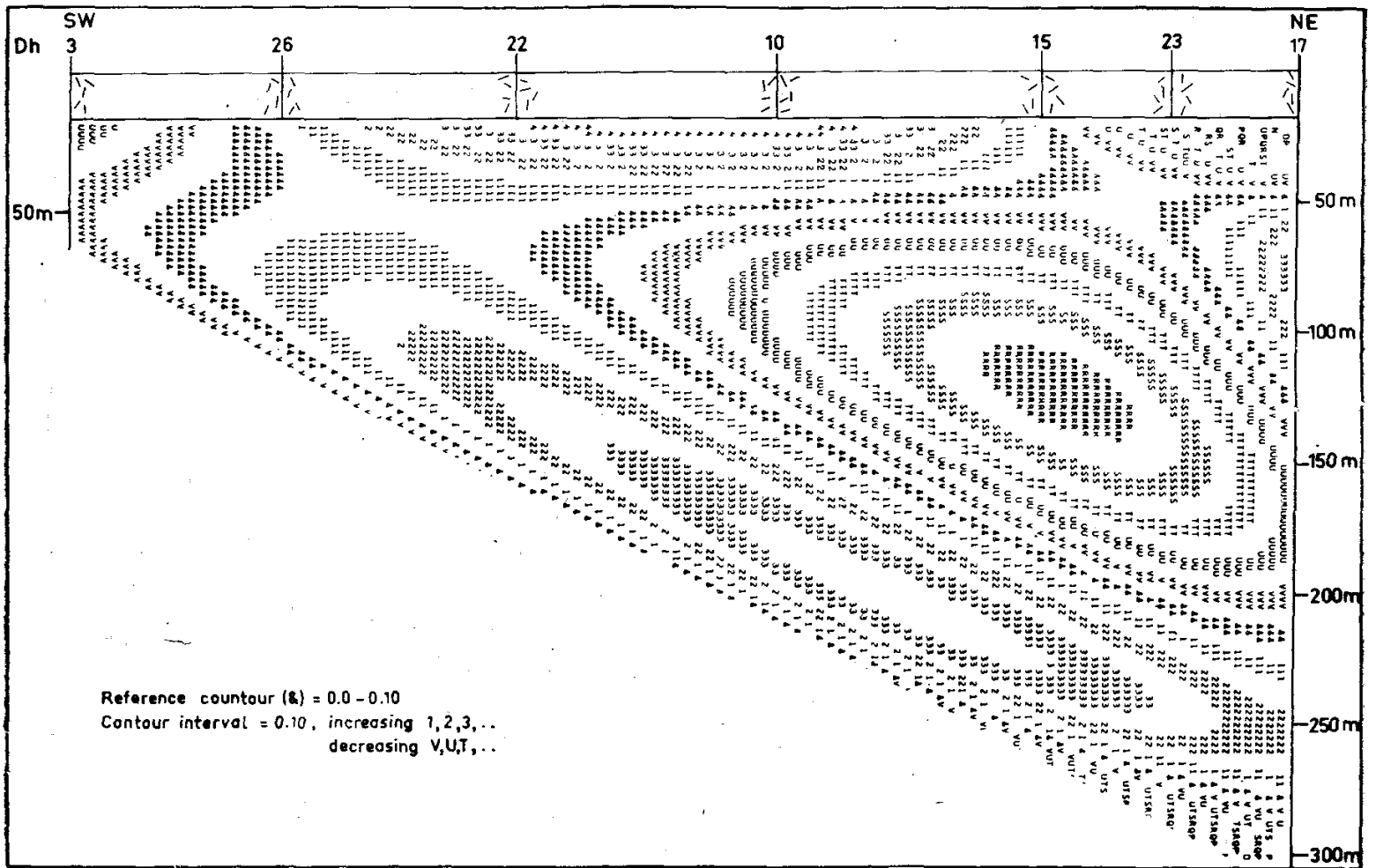
Фактор 8 (Ni, Co, Zn по отношению к Fe) является главным образом фактором Ni, но Co, Zn и Fe также влияют на него. Большие отрицательные значения соответствуют повышенным содержаниям Ni, Co и Zn и пониженным содержаниям Fe. Самые большие значения этого фактора отмечаются в зеленокаменных породах, верхней пачке полосчатых туффитов и в меньшей мере — в рудной зоне, особенно в ее наиболее богатой части и в северо-восточной оконечности. Приближение поверхности тренда очень хорошее и составляет 56%, благодаря чему она четко показывает тенденции распределения рассматриваемых элементов.

Фактор 9 (Ca по отношению к Zn) является главным образом фактором Ca, причем самые большие значения его установлены в скарнах, андезитовых породах, некоторых зеленокаменных породах и нижней пачке полосчатых туффитов. Распределение Ca не характеризуется какой-либо четкой тенденцией, что видно из анализа поверхности тренда. Точность приближения последней составляет 19%, слабо выраженный максимум наблюдается только в андезитовых породах.

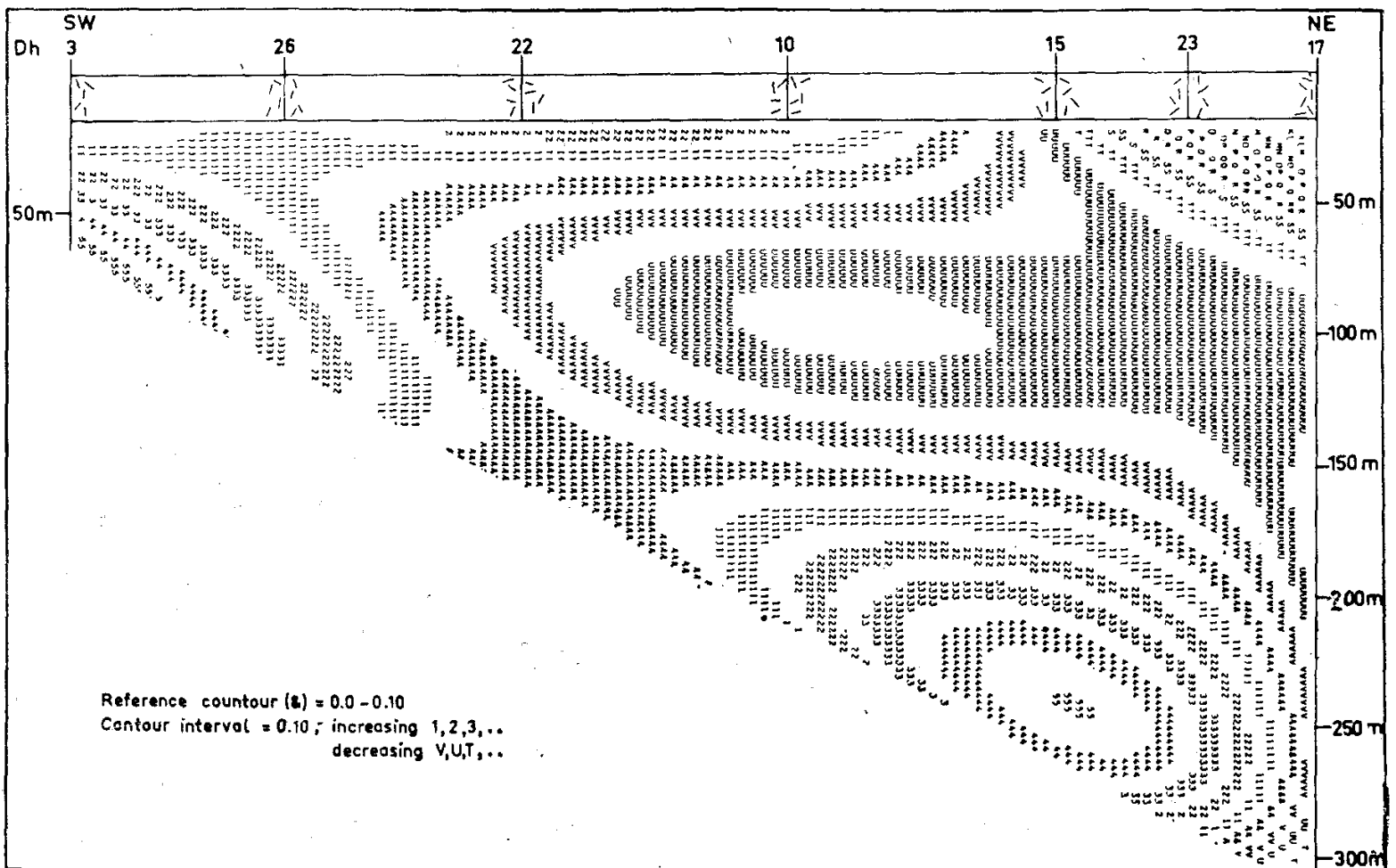
Фактор 10 (Mo). Помимо фактора 1, названный фактор также описывает поведение Mo. Самые большие его значения установлены в рудной зоне и в верхней пачке полосчатых туффитов. При этом проявляется тенденция локализации больших значений в юго-западной части рудной зоны и особенно в юго-восточной ее части. В верхней пачке полосчатых туффитов высокие значения приурочены к приповерхностным участкам. Отмеченные тенденции прослеживаются с довольно хорошим приближением (25%) на поверхности тренда, которая приводится на фиг. 8.

Фактор 11 (Bi) наряду с рудным фактором определяет поведение Bi. Большие отрицательные значения связаны с высокими содержаниями Bi. Самые большие отрицательные значения установлены в рудных пробах и вблизи рудной зоны. Большие отрицательные значения особенно часто наблюдаются вокруг верхней юго-западной части рудного тела. В северо-восточной части рассматриваемого разреза существует еще одна зона Bi с большими отрицательными значениями фактора, которая располагается согласно с рудной зоной примерно в 25 м над ней. Тренд данного фактора хорошо описывается поверхностью с точностью приближения 32%.

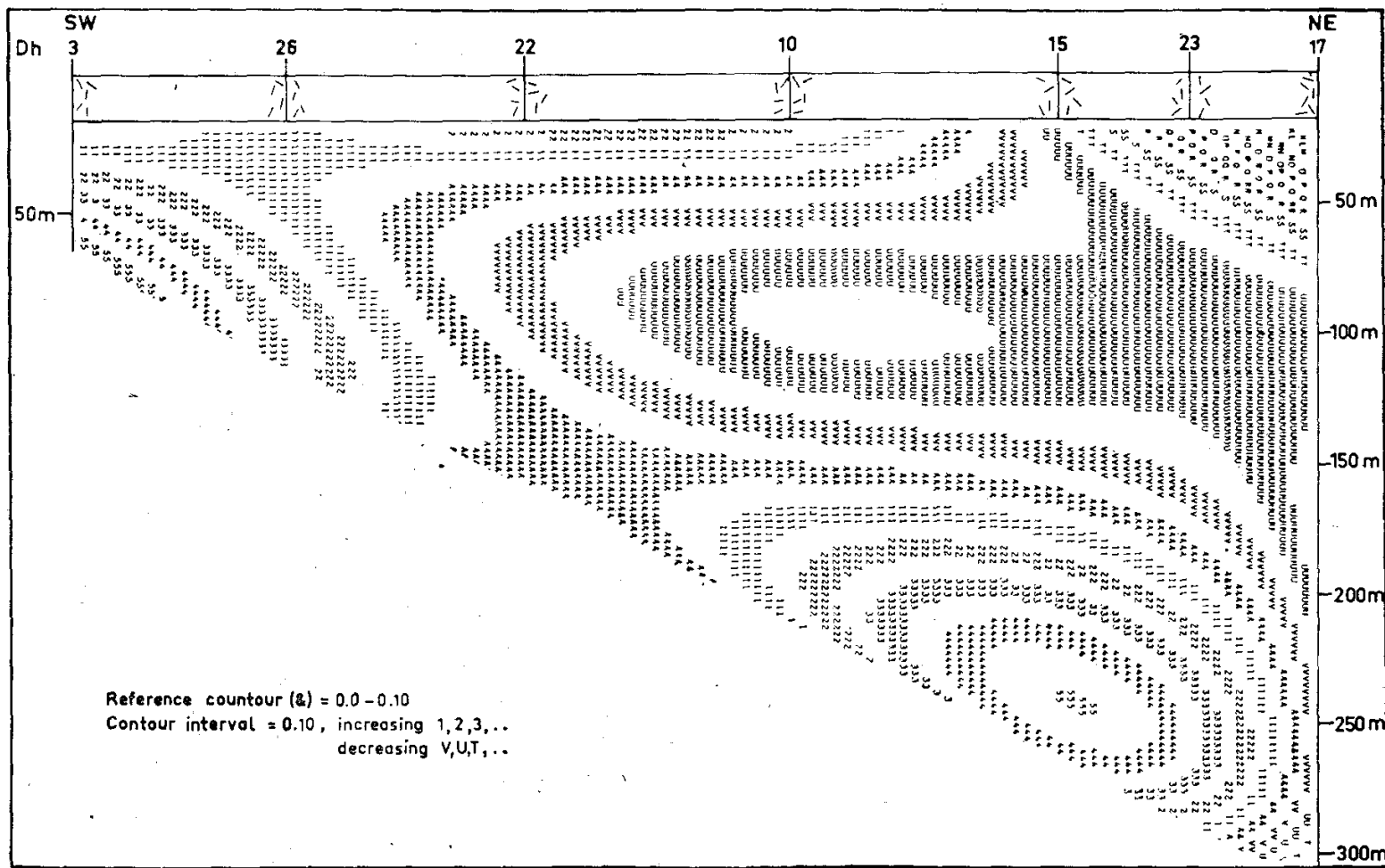
Фактор 12 (Ti по отношению к Zn). Ti и в меньшей мере Zn являются элементами, которые определяют ареальное распределение



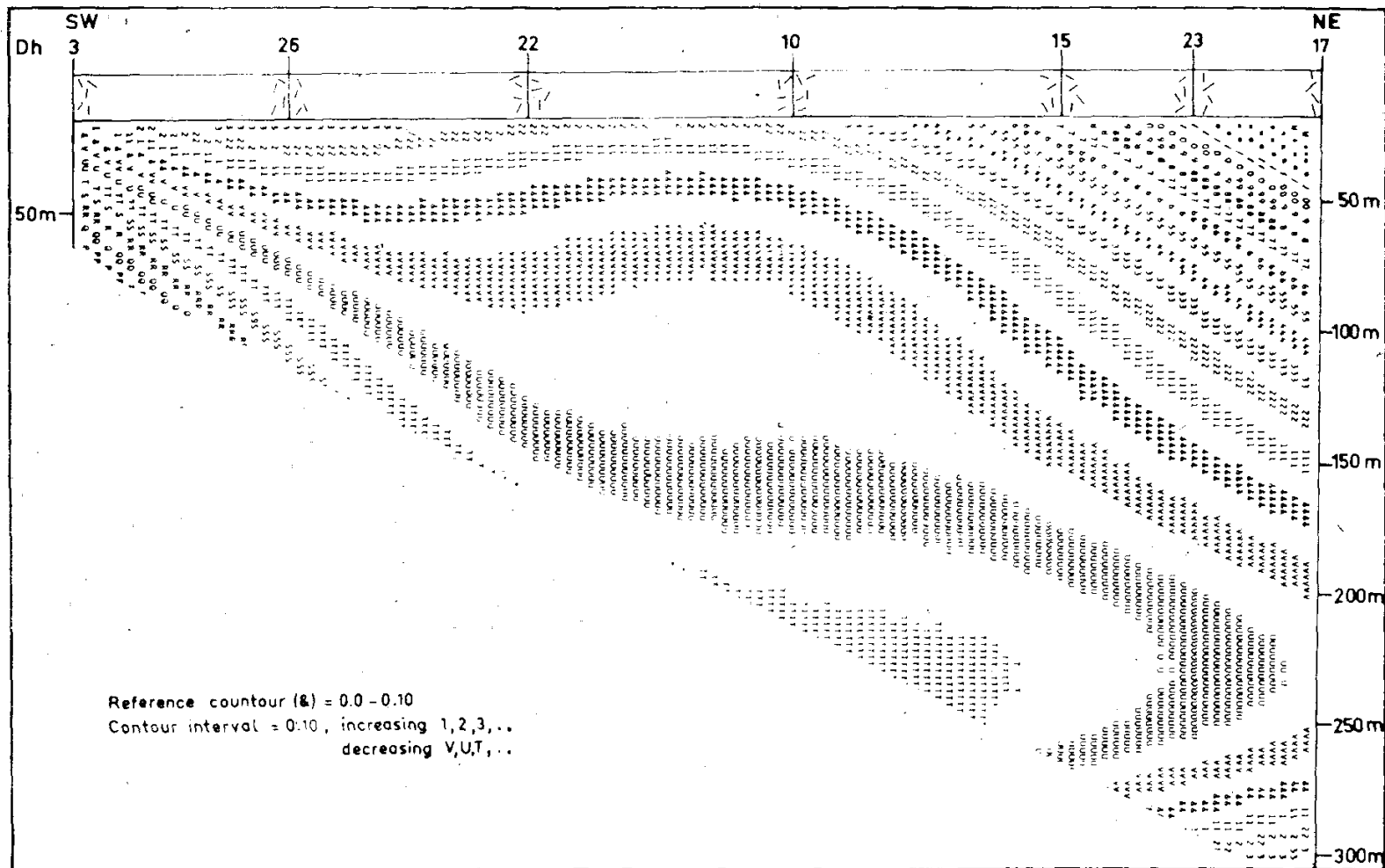
ФИГ. 6. Поверхность тренда факторных значений четвертого порядка — фактор 5 (As), точность приближения 22%.



ФИГ. 7. Поверхность тренда факторных значений четвертого порядка — фактор 7 (V), точность приближения 13%.



ФИГ. 8. Поверхность тренда факторных значений четвертого порядка — фактор 10 (Mo), точность приближения 25%.



ФИГ. 9. Поверхность тренда факторных значений четвертого порядка — фактор 13 (Cu, Fe, Zn по отношению к Co), точность приближения 42%.

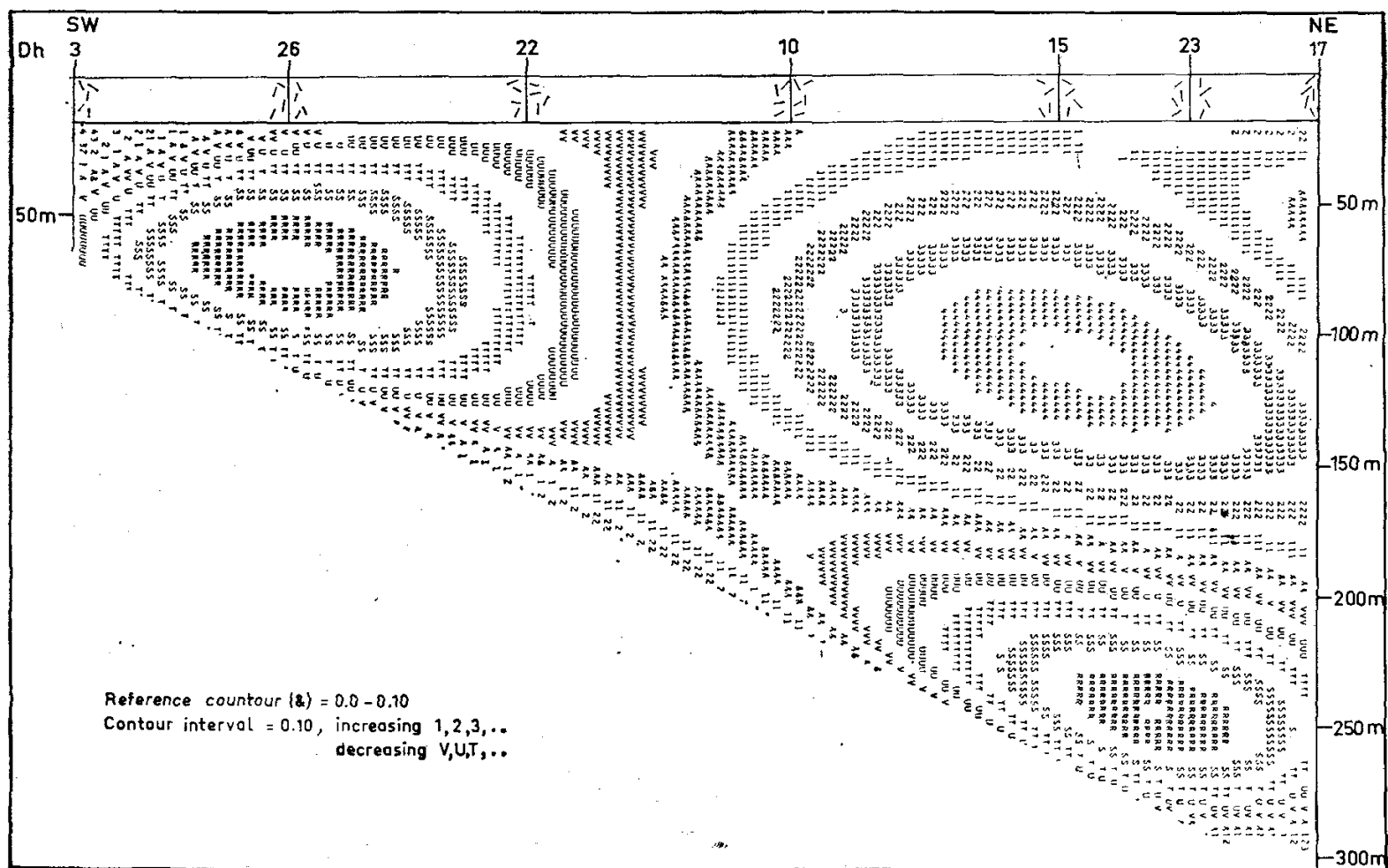
фактора 12. Пробы с высокими содержаниями Ti обычно характеризуются слегка пониженными содержаниями Zn и имеют большие отрицательные значения фактора. Максимальные отрицательные значения установлены в некоторых зеленокаменных породах и полосчатых туффилах, но согласно поверхности тренда с очень малой точностью приближения (9%); рассматриваемый фактор отличается однородным распределением по профилю. Поверхность тренда только этого фактора является незначимой при уровне значимости 99,9%.

Фактор 13 (Cu, Fe, Zn по отношению к Co), вероятно, связан с халькопиритовой минерализацией и является преимущественно фактором Cu , а также определяется Fe и в меньшей степени Zn . Большие отрицательные значения соответствуют высоким содержаниям Cu и в меньшей мере Fe и Zn , а одновременно низким содержаниям Co . Самые большие отрицательные значения установлены в рудном теле и вблизи него. В совокупности проб, из которой исключены рудные пробы, большие отрицательные значения фактора обнаруживают четкую тенденцию сосредоточения в висячем боку рудного тела. Поверхность тренда характеризуется хорошим приближением (42%) и отра-

жает указанные выше тенденции распределения (фиг. 9).

Фактор 14 (Pb, Zn) связан с $Pb - Zn$ минерализацией и является мощным в участках с его большими отрицательными значениями, как, например, в рудной зоне, особенно по скважине № 3 и в еще большей степени по скважине № 17. Согласно с рудным телом и примерно в 40 м над ним в полосчатых туффилах установлена зона с большими отрицательными значениями фактора, для которой характерна та же тенденция расширения вниз по падению в направлении на северо-восток и вверх по восстанию в направлении на юго-запад. Кроме того, высокие содержания Pb и Zn отмечаются в верхней пачке полосчатых туффилов около зеленокаменных пород. Поверхность тренда с точностью приближения 27% отражает отмеченные выше особенности распределения (фиг. 10).

Фактор 15 (Sn по отношению к Ag) с довольно маленькими нагрузками противоположных знаков на Sn и Ag описывает специфическое поведение Sn и Ag , за исключением случая их совместного появления в богатой руде и юго-западной части рудного тела, что показано фактором 1 (фиг. 4). Большие положительные значения обусловлены высокими содержа-



ФИГ. 10. Поверхность тренда факторных значений четвертого порядка — фактор 14 (Pb, Zn), точность приближения 27%.

ниями Sn. Они отмечаются главным образом в центральной части рудного тела и вокруг нее (скважины № 22, 10 и 15), а также в гранитах. Несколько меньшие значения установлены в приконтактной зоне между нижней пачкой полосчатых туффитов и андезитами, при этом более высокие значения характерны для центральной и юго-западной частей зоны. Большие отрицательные значения обусловлены высокими содержаниями Ag. Они отмечаются в юго-западной и северо-восточной частях рудной зоны в приконтактной полосе между нижней пачкой полосчатых туффитов и андезитовыми вулканами, а также в верхней пачке полосчатых туффитов и местами в зеленокаменных породах. Обычно высокие содержания Ag приурочены к зонам с высокими содержаниями Pb и Zn, при этом сравниваемые элементы характеризуются аналогичными тенденциями поведения. Довольно слабо выраженная тенденция распределения данного фактора отображается поверхностью тренда с точностью приближения 16%.

ГЛАВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ ПРИ РЕШЕНИИ МЕТОДОМ ФАКТОРНОГО АНАЛИЗА

Факторы, полученные в результате анализа совокупности полиэлементных данных, могут быть разделены на две группы: факторы, находящиеся в зависимости от литологического состава пород, и факторы, находящиеся в зависимости от рудной минерализации.

К первой группе относятся следующие факторы: 2 (Co, Fe, Zn), 3 (Ba), 4 (Mn), 6 (Mg, Co), 7 (V), 8 (Ni, Co, Zn по отношению к Fe), 9 (Ca по отношению к Zn), 10 (Ti по отношению к Zn) и частично фактор 15 (Sn по отношению к Ag). Общая тенденция распределения указанных факторов может быть довольно хорошо показана при помощи поверхности тренда четвертого порядка, за исключением фактора 4 (Mn). В геохимическом отношении изменения литологического состава пород в разрезе через месторождение Рудтжебекен описываются посредством этих факторов следующим образом.

Нижнюю пачку полосчатых туффитов можно разделить на четыре части в соответствии с их химизмом. Две из них располагаются под рудным телом, причем одна характеризуется высокими содержаниями Co — Fe — Zn, V и Ti, а другая, ее перекрывающая, — повышенными содержаниями Ba. Третья часть, обрамляющая рудное тело, отличается низкими содержаниями V и высокими Co — Fe — Zn; в юго-западных участках разреза в ней возрастают содержания Mg — Co, а в северо-восточных Ni —

Co — Zn. Над рудным телом находится четвертая часть, сложенная полосчатыми туффитами, с повышенными содержаниями Mn, Ti и Ca. Скарны отличаются высокими содержаниями Mn и Ca. Андезиты обогащены Ca и в меньшей мере Mg — Co. Для верхней пачки полосчатых туффитов характерны Ni — Co — Zn и частично Ti, тогда как Ni — Co — Zn, Mg — Co, Co — Fe — Zn и Ba концентрируются преимущественно в зеленокаменных породах. Высокие содержания Ba и Sn типичны для гранитов.

К факторам, находящимся в зависимости от рудной минерализации, относятся следующие: 1 (Ag, Sn, Zn, Cu, Bi, Pb, Mo, Fe, As), 5 (As), 10 (Mo), 11 (Bi), 13 (Cu, Fe, Zn по отношению к Co), 14 (Pb, Zn) и 15 (Sn по отношению к Ag). Перечисленные факторы и их площадное распределение, которое довольно хорошо отражено поверхностью тренда четвертого порядка, показывают различное поведение разных элементов в рудном теле и в окружающих его ореолах, а также очень сложный характер рассеяния элементов. В соответствии с распределением рассматриваемых факторов на изучаемом участке можно выделить по крайней мере три зоны минерализации, согласные с напластованием: главная рудная зона, приконтактная зона между нижней пачкой полосчатых туффитов и андезитами, а также зона оруденения в верхней пачке полосчатых туффитов.

В рудном теле халькофильные элементы в некоторых случаях появляются вместе, как показано фактором 1 (рудным), а иногда носят свой собственный характер распределения, что показано другими факторами, находящимися в зависимости от рудной минерализации; эти факторы также имеют наибольшие значения в пределах рудного тела. Рассеяние совокупности рудных элементов во вмещающих породах (фактор 1) довольно незначительно.

Обычно значения факторов, находящихся в зависимости от рудной минерализации, расположены зонально по отношению к рудному телу. Фактор Pb — Zn и фактор Mo проявляют тенденцию к концентрации в рудном теле и образуют вокруг него интенсивные ореолы в юго-западной и северо-восточной его частях.

Фактор Bi характеризуется аналогичной тенденцией, но в значительно большей мере тяготеет к верхним участкам. Cu — Fe — Zn концентрируются преимущественно в высоко-сортной руде и слагают самые широкие ореолы вокруг этих частей рудного тела. Наконец, фактор As распределяется зонально вокруг высоко-сортной руды и сохраняет свои значения по мере движения вниз по падению на глубоких горизонтах разреза через рудное тело.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЖИЛЬНОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ

В целях более тщательного изучения природы ореолов было предпринято детальное изучение керна скважины № 17, самой глубокой на рассматриваемом разрезе. Главная задача заключалась в изучении минерализации в побочных прожилках и трещинах выполнения вокруг рудного тела. В соответствии с минеральным составом прожилки были разделены на четыре типа, а именно: кварц-полевошпатовые, скарновые, хлоритовые и пренитовые. Кроме того, в гранитах, уралит-порфиритах и образовавшихся за счет них гибридных породах (фиг. 2) встречаются тонкие трещинки с кальцитом, эпидотом, хлоритом или кварцем, но они не исследовались. Настоящая работа ограничивается изучением подстилающих полосчатых туффитов и андезитов, в которых содержатся многочисленные жильные образования. Кварц-полевошпатовые прожилки встречаются наиболее часто. Они сосредоточены в верхней зоне на глубине 77—180 м и в нижней зоне на глубине 255—275 м, причем во вторую попадает рудная зона. Нижняя зона сложена крупнозернистыми кремнистыми породами, которые окаймляют рудное тело на изучаемом профиле. В верхней зоне максимальное развитие прожилков приурочено примерно к глубине 90 м, где порода напоминает по внешнему виду жилковатый гнейс. Густота развития прожилков постепенно, хотя и неравномерно, убывает по мере продвижения вниз от этого уровня. Густая сеть прожилков верхней зоны прослеживается до скважины № 10 по направлению напластования.

Скарновые, хлоритовые и пренитовые прожилки встречаются примерно в равных количествах, но реже, чем кварц-полевошпатовые прожилки. Указанные три типа образований распределены довольно неравномерно. Хлоритовые прожилки более или менее часто встречаются в зоне интенсивного развития кварц-полевошпатовых прожилков, но большая часть скарновых, хлоритовых и пренитовых прожилков приурочена к андезитовым вулканитам и контактной зоне этих пород с подстилающими полосчатыми туффитами. Проявляется также тенденция возрастания количества прожилков в зонах развития ореолов.

Кварц-полевошпатовые прожилки обычно характеризуются среднезернистым строением и изменяются по мощности от нескольких миллиметров до нескольких дециметров. Они наследуют направление сланцеватости, но довольно часто встречаются и неправильные секущие прожилки. Скарновые прожилки и трещины выпол-

нения тоже среднезернистые и сложены кварцем и разными кальциевыми силикатами (такими, как роговая обманка, актинолит, андезит, гранит, эпидот, сфен, апатит) и карбонатом, а они в свою очередь окаймляются зоной сильно эпидотизированных пород. Скарновые прожилки чаще всего развиваются по направлению сланцеватости. Два других типа прожилков характеризуются преимущественно мономинеральным составом и сложены хлоритом или пренитом. По мощности они часто менее 0,5 см и обычно дискордантны, хотя хлоритовые прожилки могут ориентироваться параллельно сланцеватости.

Последовательность образования прожилков можно проследить только в некоторых интервалах керна буровой скважины, при этом различные прожилки обычно не находятся в одних и тех же взаимоотношениях. Все же удалось установить следующую возрастную последовательность (от ранних к поздним): кварц-полевошпатовые прожилки, скарновые, хлоритовые и пренитовые прожилки. Возрастные соотношения между двумя последними типами жильных образований не были определены.

В различных прожилках установлен целый ряд рудных минералов. Широко распространен пирротин, который в больших или меньших количествах встречается в большинстве прожилков, при этом проявлена тенденция к увеличению его содержания в ореольных зонах с повышенными концентрациями металлов. В различных прожилках этих зон были обнаружены также некоторые количества пирита, арсенопирита и халькопирита. Арсенопирит установлен во всех типах прожилков, за исключением пренитовых. Единственная находка галенита встречена в пренитовых трещинах выполнения, где он ассоциирует с небольшими выделениями хорошо ограненного халькопирита и псевдогексагонального пирротина.

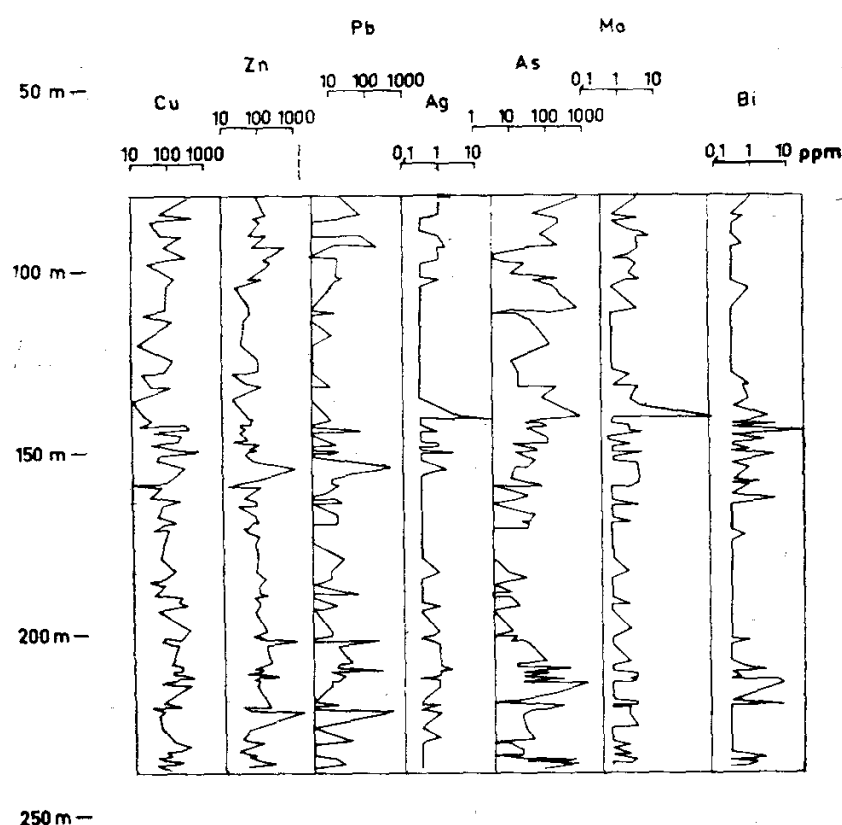
При опробовании прожилков неизбежно происходило некоторое загрязнение проб материалом вмещающих пород, которое оказалось большим в случае маломощных прожилков, особенно хлоритовых и пренитовых.

Пробы керна брались с интервалом 10 м, что соответствует густоте прожилков. Прожилки и трещины выполнения были разделены на восемь различных групп в соответствии с их минеральным составом и общим обликом. Каждая из них в свою очередь подразделялась на две подгруппы по наличию или отсутствию макроскопически видимых рудных минералов. Таким образом, было получено шестнадцать подгрупп. Все прожилки одной и той же подгруппы, находящиеся в пределах интервала 10 м, складывались вместе для получения одной объединен-

ной пробы. Последняя обрабатывалась по той же методике, которая применялась и в случае проб горных пород, хотя при этом определялось содержание только двенадцати элементов: Cu, Pb, Zn, As, Ag, Mo, Bi, Ni, Co, Fe, Ti и Mn. Детальное минералогическое исследование показало, что выделенные восемь групп прожилков могут быть объединены в четыре названных выше типа прожилков, установленных на основании минерального состава.

РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА ПРОЖИЛКОВ

На фиг. 11 графически изображены результаты анализа прожилков на халькофильные элементы. Содержания нанесены в логарифмическом масштабе в зависимости от глубины взятия пробы. (Следует указать, что анализировались только прожилки с интервала 77—237 м; рудная зона находится на глубине 260 м.) Изменения содержаний металлов в прожилках больше изменения содержаний в горных породах рассматриваемого интервала керна буровой скважины. Как видно из фиг. 11, здесь можно выделить три разные зоны с повышенными содержаниями рудных элементов; особенно четко они вырисовываются по серебру. Повышенные содержания данного элемента полностью контролируются этими зонами. Зоны с повышенными содержаниями рудных элементов, установленные на основании анализа жильных об-



ФИГ. 11. Изменение содержаний Cu, Zn, Pb, As, Mo, Bi и Ag в прожилках скважины № 17 в зависимости от глубины.

разований, полностью совпадают с обогащенными зонами ореолов, выявленными на основании анализа горных пород. Путем сравнения средних содержаний в прожилках на каждом 10-метровом интервале и средних содержаний в соответствующих пробах горных пород, в которые попадает часть прожилка, установлено, что содержания Cu, Ag, As, Mo и Bi в прожилках существенно выше для уровня значимости 95%. Таким образом, ореольная минерализация, по крайней мере частично, определяется локализацией прожилков и трещин выполнения. Содержания Pb и Zn в прожилках незначительно выше, чем в самих вмещающих породах. Существенных различий в содержании рудных элементов между двумя группами жильных образований, содержащих и не содержащих рудные минералы, не выявлено. Это объясняется тем фактом, что главный рудный минерал представлен пирротинном, а подразделение прожилков основывалось на отсутствии или наличии рудных минералов, которые определялись макроскопически только на незначительных участках прожилков, просматриваемых визуалью преимущественно на поверхности керна.

Резкие колебания в содержании различных элементов в прожилках показывают, что для этих элементов не характерно равномерное распределение, а более типична локальная концентрация, очень вероятно, в виде собственных минералов. Такая точка зрения подтверждается находками арсенопирита, халькопирита, галенита и др. в разных прожилках.

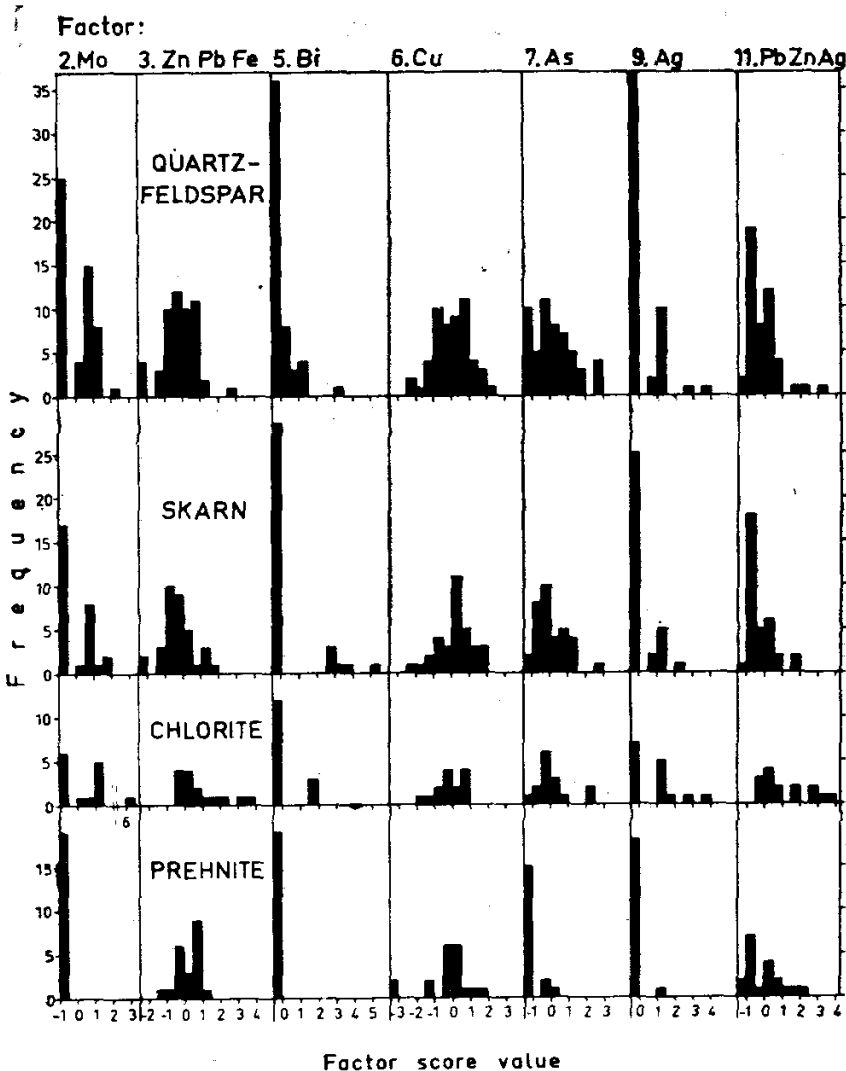
Совокупность данных, представляющих собой логарифмы содержаний элементов в прожилках, также обрабатывалась методом факторного анализа; полученные факторы приводятся в табл. VIII. Как видно из таблицы, каждый из рудных элементов — Mo, Bi, Cu и As — относится к специфическому фактору; таким образом, эти факторы не дают дополнительной информации, помимо той, которая может быть получена из рассмотрения распределения элементов. С другой стороны, каждый рудный элемент — Pb, Zn и Ag — связан сразу с двумя факторами, а именно: 3 (Zn, Pb, Fe), 9 (Ag) и 11 (Pb, Zn, Ag). Распределение халькофильных элементов в различных типах прожилков показано на фиг. 12. Вследствие отрицательных нагрузок факторов 3 (Zn, Pb, Fe), 6 (Cu), 7 (As) и 9 (Ag) знаки данных факторов на гистограммах были изменены. Сравнивая изменения на каждой гистограмме в зависимости от типа прожилков, можно установить следующие явления.

Фактор 2 (Mo) характеризуется большими значениями в кварц-полевошпатовых, скарновых

Таблица VIII

Анализы материала прожилков; Рудтжебекен, скважина 17; матрица после деортогонализирующего вращения по методу Промах; коэффициент KMIN-2 (логарифмическое преобразование)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Cu	0,05	0,00	-0,01	0,00	0,00	-1,81	-0,00	-0,04	-0,01	0,02	0,00
Zn	0,01	-0,02	-0,70	0,01	-0,01	-0,02	0,01	-0,01	-0,01	-0,01	0,16
Pb	-0,00	0,02	-0,11	-0,01	-0,00	-0,00	-0,01	-0,01	-0,05	0,01	0,72
Ag	0,04	0,07	-0,02	0,02	0,01	-0,02	-0,02	0,01	-0,67	0,00	0,10
As	0,00	0,04	0,00	0,01	0,02	-0,00	-0,83	0,00	-0,01	0,01	0,00
Mo	0,01	0,78	0,01	0,03	0,02	-0,00	-0,04	0,03	-0,04	-0,01	0,02
Bi	0,01	0,01	0,00	-0,00	0,91	-0,00	-0,02	0,00	-0,00	0,00	-0,00
Ni	-0,00	0,03	-0,01	0,89	-0,00	-0,00	-0,01	-0,02	-0,01	0,02	-0,01
Co	0,29	-0,02	0,01	0,06	0,01	-0,06	-0,02	-0,00	-0,00	0,61	0,01
Fe	0,68	0,09	-0,08	-0,07	-0,01	-0,04	-0,00	-0,13	-0,05	0,10	-0,05
Ti	0,04	-0,03	0,00	0,02	-0,01	-0,04	0,00	-0,81	0,01	-0,01	0,01
Mn	0,88	-0,06	0,05	0,05	0,01	-0,01	0,00	0,05	0,02	-0,03	0,04



ФИГ. 12. Таблицы частот, показывающие распределение факторов 2 (Mo), 3 (Zn, Pb, Fe), 5 (Bi), 6 (Cu), 7 (As), 9 (Ag) и 11 (Pb, Zn, Ag) в кварц-полевошпатовых, скарновых, хлоритовых и пренитовых прожилках скважины № 17, месторождение Рудтжебекен.

и хлоритовых прожилках, причем самые большие значения чаще всего отмечаются в хлоритовых прожилках. Фактор 3 (Zn, Pb, Fe) имеет

наибольшие значения преимущественно в хлоритовых и пренитовых прожилках и довольно низкие в двух других типах прожилков. Самые большие значения фактора 5 (Bi) отмечаются в скарновых прожилках, однако несколько повышенные значения известны также для кварц-полевошпатовых и хлоритовых прожилков. Фактор 6 (Cu) характеризуется слабо выраженной тенденцией к высоким значениям в кварц-полевошпатовых и скарновых прожилках; несколько высоких значений установлены также в хлоритовых прожилках. Высокие значения фактора 7 (As) известны в скарновых, хлоритовых и особенно кварц-полевошпатовых прожилках. Большие значения фактора 9 (Ag) очень часто отмечаются в хлоритовых прожилках, но они также встречаются в кварц-полевошпатовых и скарновых прожилках. Аналогичные соотношения установлены для фактора 11 (Pb, Zn, Ag).

На основании распределения различных факторов по разным типам прожилков были выделены следующие ассоциации:

- кварц-полевошпатовые прожилки с As, Cu, Mo, Bi(Ag);
- скарновые прожилки с As, Cu, Bi, Mo(Ag);
- хлоритовые прожилки с Pb, Zn, Ag, Mo, As, Cu(Bi);
- пренитовые прожилки с Zn, Pb(Cu).

Ассоциации элементов и минералов в кварц-полевошпатовых и скарновых прожилках соответствуют парагенезисам рудных тел района Адак, в которых Cu и As являются преобладающими элементами. Для этих месторождений характерно также наличие скарнов, тесно ассоциирующих с сульфидными рудами [9].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Во вмещающих породах сульфидного месторождения Рудтжебекен установлены изменчивые по размерам и форме ореолы. Cu, Zn, Pb, As, Ag, Mo, Sn и Bi образуют ореолы в непосредственной близости от рудного тела и в отдельных зонах над ними. Слабо выраженные дополнительные ореолы над рудным телом устойчивы и согласуются с напластованием купольной структуры. Сложные ореолы рассеяния могут быть разделены на три основные части:

1. Ореол, непосредственно окружающий рудное тело; здесь все элементы рассеиваются в боковой породе — факторы As, Mo и Cu — Fe — Zn показывают существование наиболее широких и протяженных ореолов.

2. Ореол, характеризующийся главным образом фактором Pb — Zn в надрудной части в контактовой зоне между нижним горизонтом полосчатых туффитов и перекрывающими андезитовыми породами.

3. Ореол с преобладанием As и Mo, ассоциирующими с теми же элементами, которые присутствуют в главном рудном теле; он расположен в верхней части полосчатых туффитов. Слабо выраженная зона с преобладанием As и Mo установлена в андезитовых породах по скважине № 17. Этот ореол в отличие от других не может быть прослежен по разрезу.

В первом ореоле проявляется тенденция образования зональности разными элементами вокруг рудного тела, при этом Bi характеризуется наиболее широким ореолом в верхней юго-западной части рудного тела, а Sn, Cu — Fe — Zn и As — вокруг наиболее богатой его части. Ореолы As особенно выдержаны в северо-восточном направлении. Pb — Zn, Ag и Mo в равной мере концентрируются в юго-западной и северо-восточной частях рудного тела, но их ореолы шире в северо-восточной части. Pb — Zn, Ag и Mo проявляют такую же тенденцию зональности во втором ореоле с преобладанием Pb — Zn выше по разрезу. В противоположность первому ореолу в третьем ореоле содержания As и Mo и их зона рассеяния увеличиваются вверх по падению рудного тела по направлению к поверхности.

В пределах ореолов чаще встречаются прожилки с рассеянной рудной минерализацией. Наличие таких прожилков приводит к локальному расширению ореолов и нарушению их однородности вследствие более высокого содержания в них рудообразующих элементов по сравнению с вмещающими породами. Прожилки можно подразделить на четыре основных

типа: кварц-полевошпатовые, скарновые, хлоритовые и пренитовые. Последовательность образования прожилков такова: сначала формировались относительно высокотемпературные кварц-полевошпатовые прожилки с As-, Cu- и Mo-минерализацией, которые сосредоточились в верхней части полосчатых туффитов и в меньшей мере — в андезитовых вулканитах; затем развивались высокотемпературные скарновые прожилки с As-, Cu- и Bi-минерализацией, преимущественно в андезитовых вулканитах. Эти два типа по своему парагенезису соответствуют рудным телам описываемой территории и отличаются от поздних низкотемпературных прожилков, которые характеризуются хлоритовым составом с Zn-, Pb- и Ag-минерализацией и пренитовым составом с Zn- и Pb-минерализацией. Некоторые хлоритовые прожилки встречаются в верхней части полосчатых туффитов, но большинство их образуется в андезитовых вулканитах в приконтактной зоне последних с нижним горизонтом полосчатых туффитов. Практически все пренитовые прожилки залегают в андезитовых вулканитах.

Количества элементов, находящихся в прожилках, слишком малы, чтобы объяснить содержание элементов, находящихся во всей совокупности ореолов.

В распределении прожилков разных типов не обнаруживается какой-либо простой зависимости, являющейся, возможно, следствием температурного градиента, которым объяснялось бы распределение ореолов разных типов. Более вероятно объяснение, согласно которому положение ореолов определяется текстурой пород и их составом. Таким образом, вокруг рудного тела в пределах кварцитов пород и полосчатых туффитов имеются ореолы, сложенные преимущественно As, Mo и Cu — Fe — Zn, а также довольно широкие ореолы Pb — Zn и Bi. Аналогичная зона ореолов, сложенных преимущественно As и Mo, развивается в участках с густой сетью кварцевых прожилков в верхней пачке полосчатых туффитов, которые по литологическому составу напоминают туффиты рудной зоны. В контактной зоне между нижней пачкой полосчатых туффитов и андезитами, характеризующимися наличием скарновых образований и густой сетью хлоритовых и пренитовых прожилков с довольно высокими содержаниями Ca и Mn, развиваются ореолы с преобладанием Pb — Zn. Ореолы As и Bi встречаются в связи со скарнами в верхней части андезитов.

В литературе описывалась зональность ореолов вокруг гидротермальных рудных месторождений. Согласно Л. Н. Овчинникову и др.

[13], общий характер зональности ореолов индикаторных элементов круто падающих гидротермальных рудных месторождений представлен накоплением элементов в последовательности Sn, U, Au, Co, Bi, Mo, Se, Cu, Zn, Cd, Pb, Ag, Ba, Sb, As и Hg от нижних к верхним частям ореолов. Таким образом, Sn отличается наименьшей подвижностью, а Hg — наибольшей. Подобной закономерности распределения элементов не было установлено на месторождении Рудтжебекен, где зональность ореолов характеризуется более сложным строением.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Boyle R. W., The Geochemistry of Silver and Its Deposits, Geol. Surv. Canada, Bulletin 160, 1968.
2. Brotzen O., Danielsson A., Ek J., Nairis B., Geochemical Prospecting by the Geological Survey of Sweden, Proceedings, Symposium on Geochemical Prospecting, Ottawa, April 1966.
3. Cameron E. M., A Computer Program for Factor Analysis of Geochemical and Other Data, Geol. Surv. Canada, Paper 67—34, 1967.
4. Cameron E. M., A Geochemical Profile of the Swan Hills Reef, Can. Journ. Earth Sciences, 5, 237—309, 1968.
5. Danielsson A., Spectrochemical Analysis for Geoche-

- mical Purposes, XIII Colloquium Internationale, Ottawa, 1967.
6. Esler J. E., Smith P. F., Davis J. C., KWIKR8, a Fortran IV Program for Multiple Regression and Geological Trend Analysis, Computer Contribution 28, State Geological Survey, The University of Kansas, Lawrence, 1968.
7. Garrett R. G., Nichol I., Factor Analysis as an Aid in the Interpretation of Regional Geochemical Stream Sediment Data, International Geochemical Exploration Symposium, Quart. Colorado School of Mines, 64, № 1, 245—264, 1969.
8. Gavelin S., Adakområdet, English summary, Sveriges geologiska undersökning, Ser. C, № 490, 1948.
9. Gavelin S., Lime Metasomatism and Metamorphic Differentiation in the Adak Area, Sveriges geologiska undersökning, Ser. C, № 521, 1952.
10. Gavelin S., A Telluride Assemblage in the Rudtjebäcken Pyrite Ore, Vesterbotten, N. Sweden, Sveriges geologiska undersökning, Ser. C, № 536, 1954.
11. Gavelin S., Sulphide Mineralization in the Skellefte District and its Relation to Regional Granitization, Econ. Geol., 50, 814, 1955.
12. Högbom A., Skelleftefältet, English summary, Sveriges geologiska undersökning, Ser. C, № 389, 1937.
13. Owtshinnikow L. N., Grigorian S. W., Garmasch A. A., Die Erfolge der angewandten Geochemie in der UDSSR, Zeitschrift für angewandte Geologi., Band 13, Heft 10, 1967.
14. Vinogradov A. P., The Average Content of Chemical Elements in the Principal Types of Igneous Rocks of the Earth's Crust, Geokhimiya, № 7, 1962.

РТУТЬ В РУДАХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ И ЗОЛОТА ПРОВИНЦИИ КВЕБЕК .

В. П. Спирс

«Хоган-ассошиэйтс»,
Монреаль, Квебек

ВВЕДЕНИЕ

Предположение, согласно которому сульфидные рудные тела гидротермального происхождения содержат «аномальные» количества ртути, причем эта «аномальность» может служить поисковым признаком таких месторождений, по-видимому, первым выдвинул Сауков [12].

До недавнего времени геохимия ртути в геологических образованиях была очень слабо изучена, поскольку обычные спектральные методы не могут уловить низкие содержания ртути (миллиардные доли).

ЗАДАЧИ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Данное исследование ставило перед собой следующие задачи:

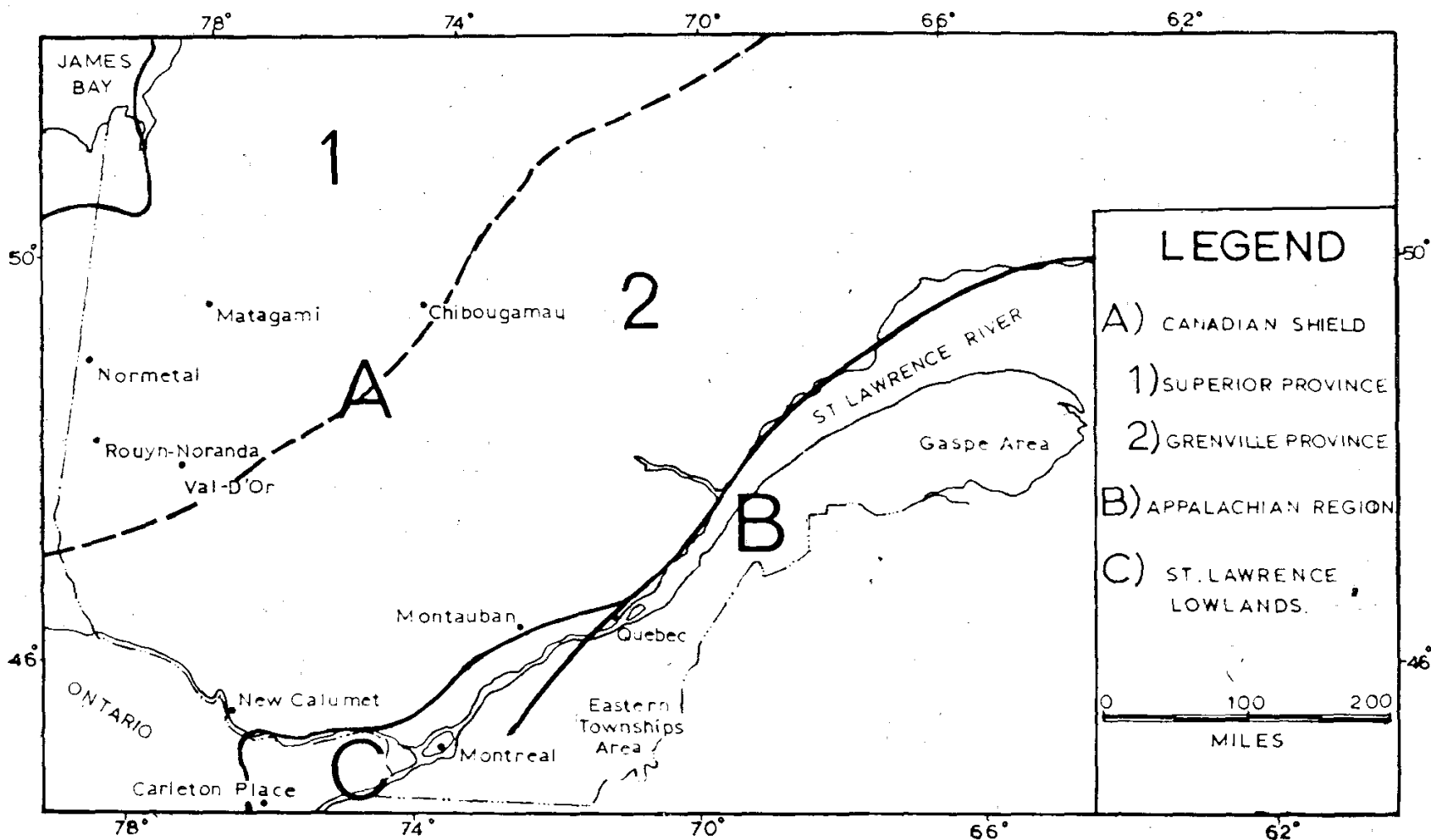
1) определить содержание ртути в рудах некоторых месторождений цветных металлов и золота провинции Квебек;

2) изучить соотношения содержаний в рудах ртути и меди, свинца, цинка, золота;

3) установить площади или районы, где геохимия ртути может быть эффективно использована при поисках.

Методы исследований. Были опробованы месторождения цветных металлов и золота всех основных рудных полей и районов провинции Квебек (фиг. 1).

На каждом руднике возникали свои трудности при опробовании, но при этом соблюдалось только одно правило — получить представительную пробу руды и некоторых вмещающих пород. Обычно брались сколковые пробы весом от 800 до 1200 г в горных выработ-



ФИГ. 1. Карта размещения изученных районов в пределах рассматриваемой территории Квебек.

ках рудника с заранее установленных интервалов, ориентированных вкост простирания рудных тел; при этом на каждом руднике брались от 10 до 30 проб.

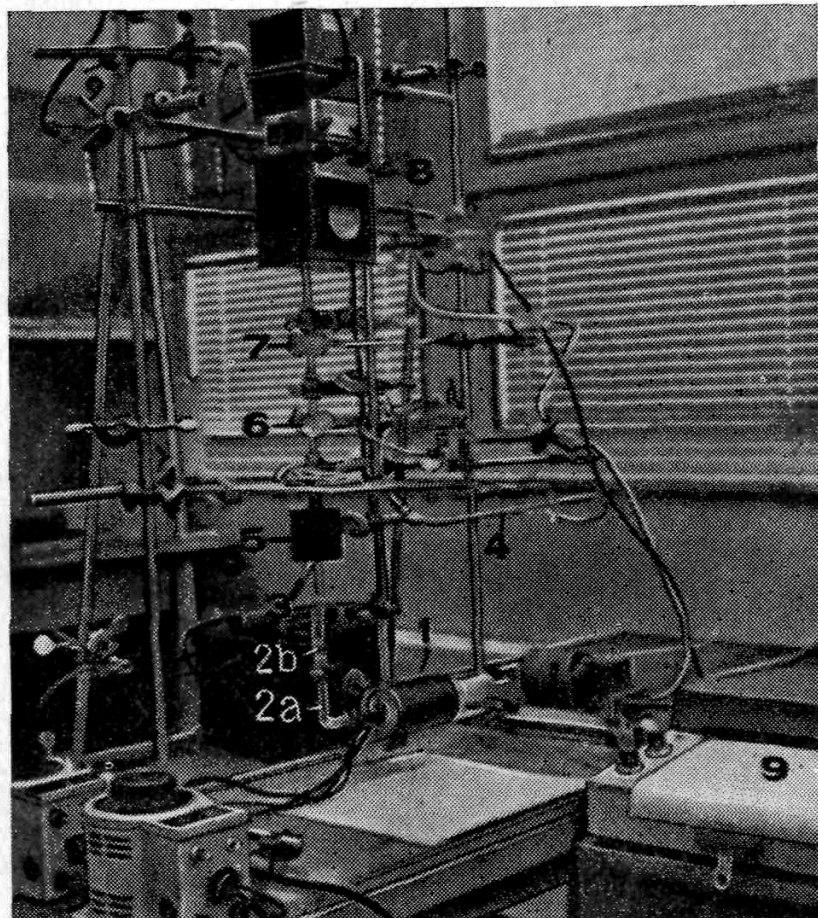
Всего было взято 600 проб, представляющих 19 действующих рудников цветных металлов, три действующих рудника на золото и пять ранее функционировавших месторождений цветных металлов.

Предварительно с каждой пробы удалялся весь поверхностный материал, а из оставшейся части пробы вырезался алмазной пилой кубик размером 2,5 см. Поверхностный материал удалялся, чтобы исключить возможное загрязнение гремучей ртутью, применяющейся в капсулах-детонаторах и некоторых взрывчатых веществах. Все пробы высушивались затем на воздухе и размалывались примерно до 0,1 мм на керамической шаровой мельнице. Далее пробы, готовые для анализа, помещали в пластиковые пакеты.

Удовлетворительные результаты анализа на ртуть были получены при помощи модифицированной однолучевой установки, описанной Аззариа [2].

Ниже приводится краткое описание установки, которую детально описали Аззариа [2], а также Аззариа и Веббер [3].

Методика анализа основана на принципе поглощения ультрафиолетового света парами ртути в области 2537 Å. Прибор (фиг. 2) состоит из электрической печи (1), в которой 0,5—1,0 г пробы прокаливается при температуре 725—775° С в течение 5—15 мин. Выделившиеся из пробы газы пропускаются через ряд стеклянных труб (2a и 2b), затем через очень тонкую золотую сетку (3), которая захватывает ртуть в результате амальгамации. Все другие думы и газы выходят по эвакуационной трубке (4). После удаления дыма и газов в однолучевую абсорбционную камеру (8) направляется струя воздуха путем поворота Т-образных клапанов (6 и 7). Ртуть, захваченная золотом, переводится затем в парообразное состояние. С этой целью электрическая печь (5), нагреваемая до температуры 900—950° С, опускается на коллектор из золотой сетки так, что он оказывается внутри печи. Образующиеся пары ртути направляются в световую абсорбционную камеру, где они вызывают изменение интенсивности света, которая измеряется при помощи фотоэлемента. Это изменение отмечается милливольтметром и регистрируется на ленте самописца (9). Количество ртути, находящейся в пробе, определяется затем по эталонной кривой (на осях координат — напря-



ФИГ. 2. Усовершенствованная однолучевая установка с золотой сеткой, применяемая для улавливания ртути.

1 — электрическая печь, нагревающая пробу; 2a и 2b — система стеклянных труб; 3 — тонкая золотая сетка; 4 — вакуационная трубка; 5 — электрическая печь, нагревающая золотую сетку; 6 и 7 — Т-образные клапаны; 8 — однолучевая абсорбционная камера; 9 — самописец.

жение, В и содержание Hg, млрд⁻¹), построенной по известным аликвотным частям паров ртути.

Содержания меди, свинца и цинка во всех сульфидных пробах определялись методом флюоресцентного рентгеноспектрального анализа. Такие анализы необходимы, чтобы определить соотношения между содержаниями меди — свинца — цинка и ртути.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Названия рудников, районы, рудные ассоциации, количество проб и пределы колебания содержаний ртути для каждого опробованного рудника приводятся в табл. I, а результаты исследований, проведенных на ртуть, рассматриваются ниже.

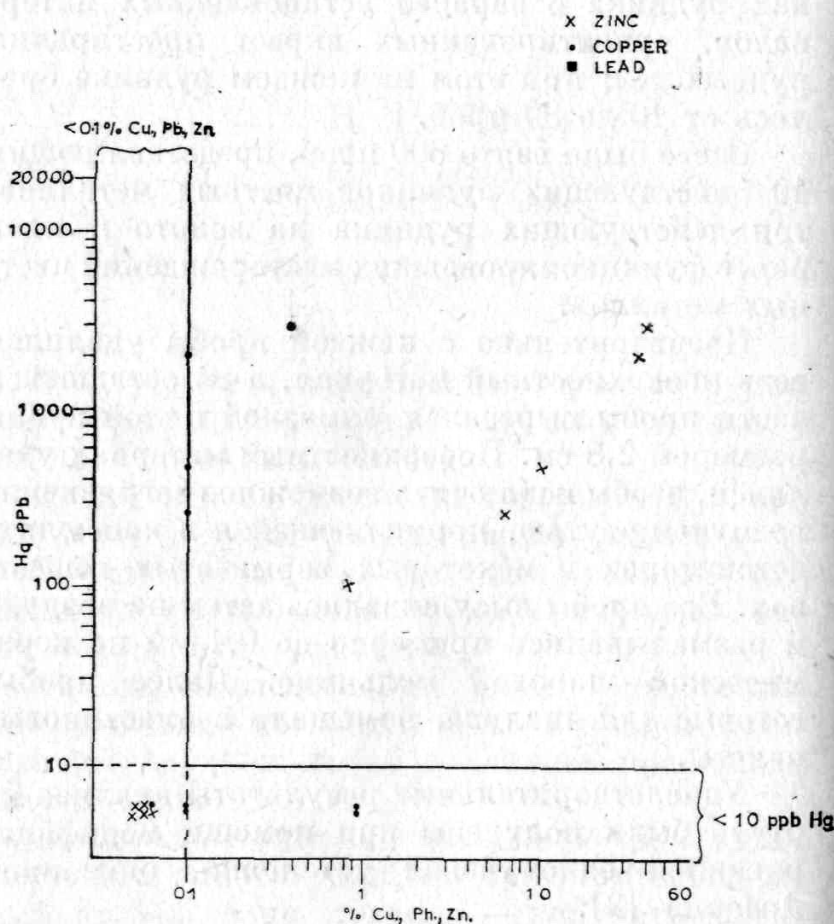
Диаграммы, показывающие изменение содержаний ртути в зависимости от содержаний меди — свинца — цинка, были составлены для каждого рудника, а более интересные диаграммы и соответствующие им данные приводятся в настоящей работе. На этих диаграммах значе-

ния Hg меньше миллиардных долей и значения Cu, Pb и Zn] меньше 0,1% произвольно отнесены в область, ограниченную линиями, соответствующими указанным содержаниям металлов.

Район Валь-д'Ор. Опробованные *золотосодержащие руды* рудников Сигма, Ламак и Камфло характеризуются низкими содержаниями ртути, не превышающими 150 млрд⁻¹ Hg.

В рудах месторождения *цветных металлов* Маниту-Барвью отмечается увеличение содержания ртути с увеличением содержания цинка, однако явной зависимости между количеством ртути и меди не устанавливается (фиг. 3). Содержание ртути в рудах и породах рудника Марбридж менее 40 млрд⁻¹ Hg, при этом заметной зависимости между содержаниями ртути и никеля в рудах не отмечается.

Район Руин — Норанда. Результаты, полученные по рудникам Хорн и Квемонт, очень сходны. В сульфидных телах обоих рудников содержание ртути обычно возрастает с увеличением содержания цинка. Максимальное значение для рудника Хорн составляет 870 млрд⁻¹ Hg в пробе, содержащей 51,3% Zn и менее 0,1% Cu. Наибольшее количество ртути в рудах Квемонт составляет 320 млрд⁻¹; оно установлено в пробе, содержащей 6,9% Zn и 0,1% Cu.



ФИГ. 3. Диаграмма рассеяния, показывающая содержание меди, свинца и цинка в рудных пробах по отношению к содержанию ртути, Маниту-Барвью-Майне.

Таблица I

Содержание ртути в некоторых рудах Квебека

Рудник	Рудный район	Состав руд	Количество проб	Пределы колебания содержания Hg, млрд ⁻¹
Камфлю-Майн	Валь-д'Ор	Золото	21	5—140
Сигма-Майн	Валь-д'Ор	Золото	14	1—85
Ламак-Майнинг	Валь-д'Ор	Золото	17	25—125
Маниту-Барвью-Майн	Валь-д'Ор	Пирит, сфалерит, халькопирит, галенит	21	10—2 700
Марбридж-Никель-Майн	Валь-д'Ор	Пентландит, пирротин, миллерит	17	1—40
Орчэн-Майн	Маттагами	Сфалерит, халькопирит, пирротин, пирит	14	10—690
Джутел-Коппер-Майн	Джутел	Халькопирит, сфалерит, пирротин, пирит	24	10—730
Кэмпбелл-Шибугамо-Майн, Мейн-Майн	Шибугамо	Халькопирит, пирротин, пирит	11	10—80
Кэмпбелл-Шибугамо-Майн, Гендерсон-Майн	Шибугамо	Пирит, пирротин, халькопирит	9	10—130
Айкон-Сулливан-Джойнт-Вентур	Шибугамо	Халькопирит с малахитом, халькозин, азурит, борнит	15	100—1 300
Норанда-Майн, Хорн-Майн	Руин	Пирит, пирротин, халькопирит	19	10—870
Квемонт-Майн	Руин	Пирит, сфалерит, халькопирит	16	10—320
Норметаль-Майн	Норметаль	Пирит, сфалерит, галенит, халькопирит, пирротин	23	10—18 000
Нью-Хоско-Майн	Маттагами	Сфалерит, халькопирит, пирротин, пирит	19	10—140
Маттагами-Лейк-Майн	Маттагами	Сфалерит, халькопирит, пирротин	22	10—3 875
Опемиска-Коппер-Майн, Спринджер-Орбоди	Шибугамо	Халькопирит	20	10—40
Сателлит-Метал-Майн, Тетрольт-Майн	Монтобан	Сфалерит, галенит, пирротин	8	60—18 700
Нью-Кальюмет-Майн	Нью-Кальюмет	Сфалерит, пирротин, галенит	15	1 300—33 000
Купра-Майн	Истерн-Тауншипс	Пирит, халькопирит, борнит, сфалерит, галенит	23	10—250
Солбек-Коппер-Майн	Истерн-Тауншипс	Сфалерит, халькопирит, галенит, пирит	18	40—1 000
Юстис-Майн	Истерн-Тауншипс	Пирит, халькопирит, сфалерит, галенит	6	40—70
Квебек-Коппер-Майн	Истерн-Тауншипс	Халькопирит	10	10—30
Гаспе-Коппер-Майн, Нидл-Маунтин	Гаспе	Пирит, халькопирит	27	1—150
Гаспе-Коппер-Майн, Коппер-Маунтин	Гаспе	Пирит, халькопирит, молибденит	6	150—350
Суллипек-Майн	Гаспе	Пирит, халькопирит, молибденит	20	1—85
Федерал-Металс-Корпорейшн	Гаспе	Сфалерит, галенит	11	1—930
Мадлен-Майн	Гаспе	Халькопирит, борнит	17	1—20
Рамзай-Лед-Майн	Ланарк, Онтарио	Галенит	11	45—170

Район Норметаль. В рудной зоне опробовались участки, обогащенные цинком и медью. Результаты анализа показывают, что обогащенный цинком участок значительно богаче ртутью, содержание которой достигает 18 000 млрд⁻¹ Hg в пробе, имеющей 18,2% Zn

и медь в количествах ниже чувствительности анализа. В обогащенной медью руде повышение содержания цинка, по-видимому, не сопровождается увеличением количества ртути. Максимальное содержание последней в обогащенных медью участках составляет 260 млрд⁻¹ Hg

при одновременном наличии 4,5% Cu и 8,2% Zn. Количество свинца в пробах, как правило, невелико и не зависит от содержания ртути.

Районы Маттагами и Джутел. В рудах месторождений Маттагами, Нью-Хоско и Орчэн обычно отмечается увеличение содержания ртути с возрастанием содержания цинка. Пробы с повышенным количеством ртути, как правило, обогащены цинком. Руды Маттагами характеризуются наиболее высокими содержаниями ртути, при этом максимальное значение составляет 3875 млрд⁻¹ Hg в пробе, имеющей 24,5% Zn и медь в количествах ниже чувствительности анализа.

Медные руды района Джутел рассматриваются отдельно, так как они находятся в другом рудном поле, обособленном от района Маттагами. Содержание ртути обычно возрастает в них с увеличением количества меди до 4% Cu; дальнейшее увеличение содержания меди сопровождается уменьшением количества ртути. Максимальное содержание ртути в медных рудах составляет 150 млрд⁻¹ Hg при одновременном наличии 3,6% Cu и отсутствии свинца и цинка. В четырех пробах массивного сфалерита установлено максимальное количество ртути (7280 млрд⁻¹) при наличии 51,4% Zn.

Район Шибугамо. Руды месторождений Гендерсон, Мейн, Опемиска и Айкон сложены сульфидами железа и меди и не содержат сульфидов цинка или свинца. Сульфиды меди месторождения Айкон отличаются самыми высокими содержаниями ртути. Максимальная концентрация ее составляет 1300 млрд⁻¹, при 11,9% Cu. Рассмотрение всех полученных результатов анализов показывает отсутствие закономерной связи между ртутью и медью.

Провинция Гренвилл. Район Монтобан. Пробы района Монтобан характеризуются наличием прямой, почти линейной зависимости между содержаниями ртути и цинка. При этом максимальное количество ртути составляет 18 460 млрд⁻¹ при наличии 36,3% Zn.

Район Нью-Кальюмет. В сульфидных рудниках Нью-Кальюмет установлена прямая, почти линейная зависимость между содержаниями ртути и цинка. Наибольшему содержанию ртути (32 800 млрд⁻¹) соответствует 46,4% Zn. Если нанести на график содержания свинца в зависимости от количества ртути, то соответствующие точки обычно рассеиваются, не выявляя какой-либо закономерности. Руды Нью-Кальюмет характеризуются самыми высокими содержаниями ртути из всех проанализированных проб.

Аппалачи. Район Истern-Тауншипс. В сульфидных пробах рудников Юстис и Квебек-Кош-

пер установлены низкие содержания ртути, не превышающие 70 млрд⁻¹.

В пробах рудников Солбек и Купра не проявляется закономерной связи между содержаниями меди — свинца — цинка и ртути. Максимальное количество последней в руде Купра составляет 250 млрд⁻¹ при 13,8% Cu, а в руде Солбек 1000 млрд⁻¹ при 9,6% Zn и количествах свинца и цинка ниже чувствительности анализа. Руды Солбек несколько богаче ртутью по сравнению с рудами Купра. Вероятная причина этого заключается в более высоких содержаниях цинка в пробах рудника Солбек.

Район Гаспе. Руды района Гаспе в целом характеризуются низкими содержаниями ртути. Это особенно характерно для рудников Суллипек и Майн-Мадлен. Максимальное количество ртути в рудах Майн-Мадлен составляет 26 млрд⁻¹ при 7,6% Cu. В рудах Суллипек соответствующие значения равны 190 млрд⁻¹ Hg и 0,8% Cu. Руды района Гаспе из Коппер-Маунтин в два-три раза богаче ртутью по сравнению с рудами из Нидл-Маунтин. Максимальное содержание ртути в пробах из Коппер-Маунтин достигает 340 млрд⁻¹ Hg при 0,33% Cu. В пробах рудной зоны А из Нидл-Маунтин определено максимальное значение 150 млрд⁻¹ Hg при наличии 0,1% Cu, тогда как в зоне С соответствующие значения составляют 40 млрд⁻¹ Hg и 0,2% Cu. Из этих весьма предварительных данных следует, что содержание ртути возрастает от нижней зоны С к верхней зоне А.

В свинцовых и цинковых рудах из Федерал-Металс с возрастанием количества цинка обычно отмечается увеличение содержания ртути. При нанесении на график содержания свинца по отношению к содержанию ртути точки на графике рассеиваются и закономерной связи между этими элементами не проявляется.

Изменность Святого Лаврентия. Месторождение Рамзай. В пробах месторождения Рамзай максимальное количество ртути достигает 170 млрд⁻¹ при 15,2% Pb. Содержание ртути, по-видимому, слегка возрастает с увеличением содержания свинца, однако, чтобы подтвердить это положение, необходимо большое количество дополнительных проб.

ОБЩЕЕ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты данного исследования показывают, что цинковые сульфидные руды провинции Квебек характеризуются самыми высокими концентрациями ртути, а железо-медные сульфидные руды — самыми низкими. В большинстве цинковых руд отмечается возрастание

количества ртути с увеличением содержания цинка; в медных рудах такая закономерность не проявляется.

Золотоносные руды Квебека обычно содержат меньше ртути, чем медные, свинцовые и цинковые сульфидные руды. В США и Швеции установлена обратная картина, т. е. в золотоносных рудах содержится больше ртути, чем в медных, свинцовых и цинковых сульфидных рудах [7, 8, 1]. Низкие содержания ртути в золотоносных рудах Квебека трудно объяснить; возможно, это обусловлено отсутствием золота в проанализированных пробах.

Высокие содержания ртути в сульфидных рудах меди месторождения Айкон могут быть объяснены по-разному. Сульфидные руды Айкон, содержащие карбонаты, обычно богаче ртутью, чем массивные сульфидные руды меди. Повышенные содержания ртути в рудах Айкон можно объяснить наличием этой сульфидно-доломитовой ассоциации. В то время как руды всех других месторождений района Шибугамо (и в других районах) находятся в измененных основных породах и вулканитах, руды Айкон залегают в протерозойских доломитах. Ртуть могла также мигрировать вдоль пологого разлома, к которому приурочено рудное тело Айкон. Следовательно, структура может играть важную роль в локализации ртути.

В районе Норметаль зона с цинковой минерализацией значительно богаче ртутью, чем зона с медной минерализацией, хотя некоторые пробы из меденосной зоны и содержат большие количества цинка. Вполне вероятно, что присутствие меди в этих пробах может некоторым образом подавлять высокие содержания ртути в сульфидных рудах.

Интересно отметить, что два рудных месторождения в провинции Гренвилл (рудники Нью-Кальюмет и Монтобан) обычно считают образовавшимися при самых высоких температурах и давлении по сравнению со всеми месторождениями цветных металлов и золота провинции Квебек. Казалось бы, если ртуть присутствовала в исходных рудообразующих растворах, то высокие температуры и давления могли бы способствовать отгонке большей ее части. Поэтому можно допустить, что: 1) ртуть привносилась на поздней стадии, т. е. происходило пострудное отложение; 2) высокие давления препятствовали отгонке ртути; 3) температурный градиент определял локализацию ртути.

В районе Гаспе рудное тело Коппер-Маунтин рассечено многочисленными трещинами, тогда как в рудном теле Нидл-Маунтин трещины обычно отсутствуют. Кажется резонным пред-

положение, что эти трещины могли обеспечить доступ паров ртути, которые могли бы мигрировать в рудное тело и тем самым обусловить повышенные содержания ртути в рудах Коппер-Маунтин.

Как утверждает Джеймс [8], количество ртути, находящейся в рудах, обычно является функцией температуры отложения, поэтому большая часть ртути фиксируется в эпитермальных месторождениях, а незначительная — в гипотермальных. Но, к сожалению, данную гипотезу невозможно ни подтвердить, ни опровергнуть на примере описанных здесь месторождений провинции Квебек по следующим причинам: 1) нельзя с какой-либо достоверностью показать (а для большинства названных здесь месторождений эти данные и не приводились), являются руды эпитермальными, мезотермальными или гипотермальными; 2) рудные месторождения провинции Квебек в большинстве случаев претерпели пострудный метаморфизм, в ходе которого могла отгоняться большая часть ртути эпитермальных месторождений, что привело бы к понижению содержания ртути.

Несмотря на тот факт, что имеющиеся пробы не поддаются статистической обработке, представляется интересным выделить районы, где концентрации ртути в рудах максимальны. Для этого были вычислены средние содержания ртути в рудах во всех геологических регионах и рудных районах (табл. II). В тех случаях, когда содержания ртути в пробах оказывались ниже предела чувствительности анализа, этим пробам приписывалось нулевое значение. Поскольку в предыдущих разделах указывалось, что обогащенные цинком пробы характеризуются наибольшими содержаниями ртути и существует корреляционная связь между этими двумя металлами, было решено изучать сульфидные руды для двух групп: содержащие цинк сульфиды (количество цинка превышает 0,1%) и не содержащие цинк сульфиды (большинство их представлено сульфидами железа — меди).

Анализ значений средних содержаний ртути показывает следующее: 1) цинковые руды двух месторождений в Гренвилле характеризуются самыми высокими содержаниями ртути из всех опробованных районов, 2) медные руды района Шибугамо отличаются наибольшими содержаниями ртути среди всех медных руд и 3) цинковые руды докембрийского щита обычно богаче ртутью по сравнению с цинковыми рудами Аппалачей.

Не содержащие цинк сульфиды низменности Святого Лаврентия нельзя сравнивать с другими не содержащими цинк сульфидами,

Таблица II

Средние содержания ртути в сульфидных рудах Квебека

Количество проб	Тип проб	Место взятия проб	Среднее содержание Zn, %	Среднее содержание Hg, млрд ⁻¹
349	Все сульфиды	Квебек	Не вычислялось	1 090
155	Цинксодержащие сульфиды	Квебек	Не вычислялось	2 375
194	Не содержащие цинк сульфиды	Квебек	Не вычислялось	65
89	Цинксодержащие сульфиды	Провинция Суперьюр, все рудные районы	14,0	1 115
5	Цинксодержащие сульфиды	Валь д'Ор	17,0	970
8	Цинксодержащие сульфиды	Руин-Норанда	7,8	410
21	Цинксодержащие сульфиды	Район Норметаль	13,8	2 950
55	Цинксодержащие сульфиды	Район Маттагами — Джутел	15,2	530
23	Цинксодержащие сульфиды	Провинция Гренвилл, все рудные районы	23,6	11 373
43	Цинксодержащие сульфиды	Аппалачи, все рудные районы	5,0	170
33	Цинксодержащие сульфиды	Истерн-Тауншипс	4,4	142
10	Цинксодержащие сульфиды	Район Гаспе	6,3	270
Нет	Цинксодержащие сульфиды	Низменность Святого Лаврентия		
114	Не содержащие цинк сульфиды	Провинция Суперьюр, все рудные районы		75
22	Не содержащие цинк сульфиды	Валь-д'Ор		16
17	Не содержащие цинк сульфиды	Руин — Норанда		65
1	Не содержащие цинк сульфиды	Район Норметаль		20
21	Не содержащие цинк сульфиды	Маттагами — Джутел		53
53	Не содержащие цинк сульфиды	Район Шибугамо		115
Нет	Не содержащие цинк сульфиды	Провинция Гренвилл		
75	Не содержащие цинк сульфиды	Аппалачи		52
13	Не содержащие цинк сульфиды	Истерн-Тауншипс		78
62	Не содержащие цинк сульфиды	Район Гаспе		46
5	Не содержащие цинк сульфиды (все галениты)	Низменность Святого Лаврентия		138

поскольку первые представлены галенитовыми рудами.

Сопоставление данных по ртути, полученных в результате выполнения настоящей работы, с данными, полученными другими исследователями [7, 8, 9, 11], показывает, что содержания ртути, установленные этими исследователями, существенно выше содержания ртути в рудах месторождений провинции Квебек. Однако необходимо указать, что прямое сравнение данных по разным странам и даже районам следует производить чрезвычайно осторожно, так как ряд факторов, таких, как тип месторождения, степень метаморфизма и способ определения микроколичеств ртути, а также многие другие неизвестные факторы могут в значительной мере изменять определяемое содержание ртути в рудах.

Предыдущие и настоящее исследования согласуются по следующим положениям: 1) среди

сульфидов меди, свинца, цинка и железа сульфиды цинка характеризуются самыми высокими содержаниями ртути, 2) обычно в сульфиде свинца находится больше ртути, чем в сульфиде железа — меди.

ВЫВОДЫ

Выполненные исследования показали, что во многих пробах руд провинции Квебек ртуть содержится в аномальных количествах. Следует еще доказать, что пары ртути могут мигрировать или мигрировали из данных руд во вмещающие породы и почвы, и это будет предметом последующего этапа исследования.

В применении к поискам месторождений цветных и драгоценных металлов Квебека полученные результаты доказывают необходимость продолжить работу в провинции Гренвилл и районах Шибугамо, Норметаль и Гаспе. Счи-

тается целесообразным и перспективным опробование почвы и воздуха в провинции Гренвилл над месторождениями Нью-Кальюмет и Монтобан или около них. Если почва и воздух будут содержать аномальное количество ртути, это должно послужить доказательством целесообразности проведения воздушных поисков на ртуть, что позволило бы оконтурить перспективные для более детальных поисков работ площади. Работу такого типа проводят сейчас Маккарти и др. [10] в некоторых районах США.

Месторождение Айкон-Сулливан-Джойнт-Вентур в районе Шибугамо характеризуется аномальными содержаниями ртути по сравнению с другими медно-сульфидными месторождениями. Было бы интересно проанализировать серию почвенных проб над этим месторождением, а также проверить, содержит ли карбонатный материал прожилков аномальное количество ртути по сравнению с безрудными карбонатами района.

В районе Норметаль рекомендуется провести литогеохимические и воздушные поиски, аналогичные поискам в провинции Гренвилл. Наконец, дальнейшее изучение месторождения Гаспе-Коппер и других рудопроявлений цветных металлов в районе Гаспе могло бы показать наличие корреляционной связи ртути со структурой рудных месторождений.

Сомнительно, сможет ли ртуть служить «универсальным следопытом». Однако миграция паров ртути из рудных месторождений могла бы оказаться ценным фактором при поисковых работах и иметь широкое применение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Akright R. L., Radtke A. S., Grimes D. J.*, Minor Elements as Guides to Gold in the Roberts Mountains

Formation, Carlin Gold Mine, Eureka County, Nevada, International Geochem. Exploration Symposium, Quarterly, Colorado School of Mines, 64, № 1, January, 49—66, 1969.

2. *Azzaria L. M.*, A Method of Determining Traces of Mercury in Geologic Materials, Geol. Surv. Canada, Paper, 66—54, 13—26, 1967.
3. *Azzaria L. M., Webber G. R.*, Mercury Analysis in Geochemical Exploration, CIM Bulletin, 62, № 686, 1969.
4. *Barringer A. R.*, Interference-free Spectrometer for High-Sensitivity Mercury Analysis of Soils, Rocks and Air, Trans. Inst. Min. and Met., 75, 120—124, 1966.
5. *Chan S. S. M.*, Suggested Guides for Exploration from Geochemical Investigation of Ore Veins at the Galena Mine Deposits, Shoshone County, Idaho, International Geochem. Exploration Symposium, Quarterly, Colorado School of Mines, 64, № 1, January, 139—165, 1969.
6. *Fursov V. Z.*, Halos of Dispersed Mercury as Prospecting Guides at the Achisai Lead-Zinc Deposits, Geochem., № 3, 338—344, 1958.
7. *James C. H.*, A Review of the Geochemistry of Mercury (excluding analytical aspects) and its Application to Geochemical Prospecting, Imperial College of Science and Technology, Geochemical Research Center, Technical Communication, № 41, 42, 1962.
8. *James C. H.*, The Potential Role of Mercury in Modern Geochemical Prospecting, Mining Magazine, July, 23—32, 1964.
9. *Jolly J. L., Heyl A. V.*, Mercury and Other Trace Elements in Sphalerite and Wallrocks from Central Kentucky, Tennessee and Appalachian Zinc Districts, U.S. Geol. Surv., Bull. 1252-F, 1968.
10. *McCarthy J. H., Vaughn W. W., Learned R. E., Meuschke J. L.*, Mercury in Soil, Gas and Air — a potential tool in mineral exploration, U.S. Geol. Surv., Circular 609, 1969.
11. *Ozerova N. A.*, The Use of Primary Dispersion Halos of Mercury in the Search for Lead-Zinc Deposits, Geochew., № 7, 793—802, 1959.
12. *Сауков А. А.*, Геохимия ртути, Тр. ин-та геол. наук АН СССР, вып. 78, 1946.
13. *Sears W. P.*, Mercury of the Base Metal and Gold Ores of the Province of Quebec, unpublished M. Sc. thesis, Université Laval, Québec, P.Q., 1969.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СУЛЬФИДОВ И ИЗОТОПОВ СВИНЦА ПРИ ПОИСКАХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ В ПАЛЕОЗОЙСКИХ ПОРОДАХ ЦЕНТРАЛЬНЫХ ШТАТОВ США

Е. Е. Анджино,
Е. Д. Гобел, Т. К. Уог
Геологическая служба
штата Канзас, Канзасский
университет, Лоуренс

ВВЕДЕНИЕ

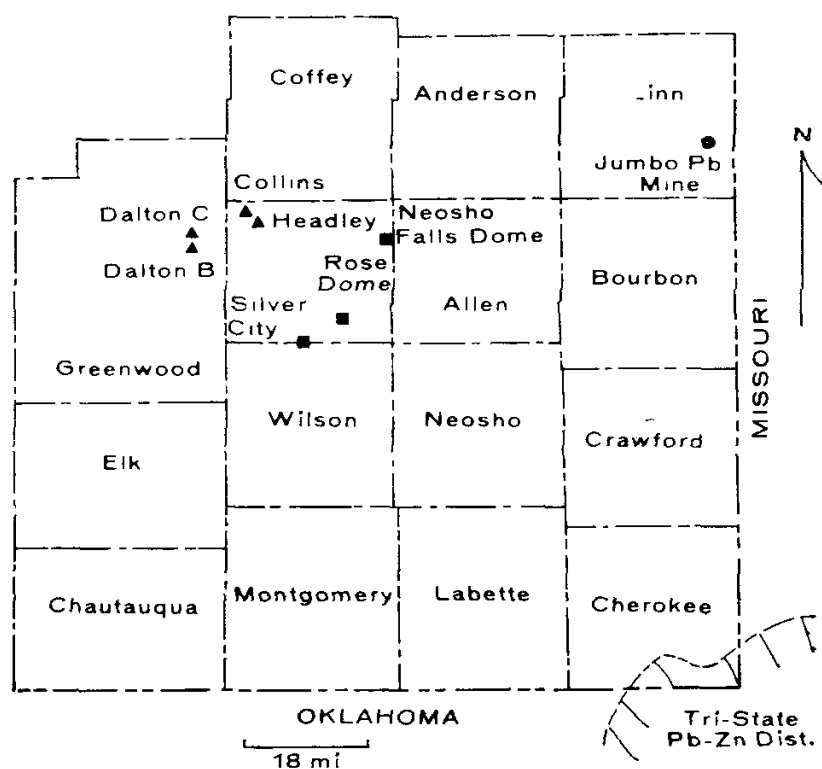
Исследование сульфидов и изотопов свинца в палеозойских породах центральных штатов США для целей поисков было предпринято Геологической службой штата Канзас при изучении нерастворимой в уксусной кислоте фракции пород миссисипского возраста. Выделение тяжелых минералов из этой фракции проводилось стандартными методами. Образцы изученных карбонатных пород отобраны из керна нефтяных скважин при исследовании фосфорсодержащих микроорганических остатков, особенно конодонт, предпринятом с целью использования их для биостратиграфической корреляции палеозойских пород. О наличии небольшого количества сульфидов, в частности сфалерита, пирита, халькопирита и галенита, сообщал Гобел [6] при биостратиграфическом изучении пород миссисипия в Канзасе, в которых Ли [10] ранее отмечал присутствие кристаллов сфалерита. Эванс [3, 4] указывал на наличие сфалерита в образцах из керна нефтяных скважин, прой-

денных в глубоко залегающих ордовикских породах двух участков западного Канзаса. Гобелом и др. [7] на месторождениях района Три-Стейт (фиг. 1) изучена биостратиграфическая зона с конодонтами.

АНАЛИЗ ПОРОД КЕРНА СКВАЖИН

Геологическая служба Канзаса, учитывая необходимость изучения сульфидной минерализации пород за пределами рудного района Три-Стейт, начала проводить эмиссионный спектральный анализ керна по всей длине скважин. При опробовании керна вырезанная из него вертикальная пластина делилась на части по 30—90 см, представляющие собой отдельные пробы. Последние дробились и истирались до 325 меш, затем квартовались до необходимых размеров. Полученные пробы представительны для соответствующего интервала керна.

При проведении исследований были использованы опубликованные ранее работы. Одной из таких работ явилось сообщение Лайдена [12] по рудному полю Пичер в свинцово-цинковом районе Три-Стейт, которое касалось взаимоотношений между серым доломитом, рудой, джаспероидом и известняком. Позже Ловеринг и Гамильтон [11] установили критерии наличия сульфидных руд в джаспероиде (этим термином была названа окремненная карбонатная порода). В их работе использовались образцы из района Три-Стейт, который многие исследователи относят к пластовым месторождениям типа Миссисипи-Валли. Ловеринг и Гамильтон разделили пространственно безрудные и продуктивные джаспероиды. Образцы, взятые из горных выработок, в которых производилась добыча руды, или вблизи них, считались представительными для продуктивных джаспероидов, а породы, залегающие в 400—600 м от рудных тел, отнесены к безрудным. Образцы из рудного района Три-Стейт, изученные Гобелом и др., взяты из стенок шахты и вентиляционных штреков в известняке и джаспероиде. Ловеринг и Гамильтон считали, что критерии, установленные ими для продуктивных джаспероидов, можно использовать для выделения тел джасперои-



ФИГ. 1. Карта юго-восточного Канзаса.

Треугольниками и квадратами показано расположение скважин, керна которых был проанализирован полуквантитативным эмиссионным спектральным методом.

дов, непосредственно связанных с сульфидными рудами.

Частичное опробование керн скважин, пробуренных на территории Канзаса за пределами района Три-Стейт, и анализ проб на Pb, Zn, Cu, Ni, Mo и Ag были выполнены Геологической службой этого штата до появления в печати результатов работы Ловеринга и Гамильтона, однако их работа во многом способствовала успешному проведению наших исследований. Минералы, характерные для района Три-Стейт, наблюдались в небольших количествах в керне джаспероидной толщи пород. Были начаты исследования, включавшие полуколичественный эмиссионный анализ керн по всей длине специально выбранных для этого скважин и изучение сульфидных минералов из нерастворимой в уксусной кислоте фракции проб. Последние отобраны из керн четырех скважин, пробуренных на юго-востоке Канзаса (две в округе Вудсон, две в округе Гринвуд) в породах миссисипия, среди которых преобладают плотный серый кремнистый доломит и известняк. Кремнистая фракция по весу составляет 20—60% пород керн. В двух скважинах эта фракция содержит конодонтовую зону (о которой сообщили Томпсон и Гобел [14]), подобную зоне, описанной Гобелом и др. [7] на месторождениях района Три-Стейт. Кристаллы сфалерита, пирита, халькопирита, ковеллина (?) и борнита были определены в керне всех четырех скважин; галенит в них не обнаружен. Наличие коррелируемых зон с органическими остатками и сходство литологии изученного керн с литологией района Три-Стейт являются убедительными признаками родства оруденения и вмещающих пород этих районов. Гобел, Уог и Анджино [8] установили, что содержания свинца, цинка, никеля и меди, являющихся по данным Ловеринга и Гамильтона индикаторами продуктивности джаспероидов, в породах керн всех четырех скважин очень высоки. Концентрации этих элементов во всех случаях превышали средние их содержания в карбонатных породах, приводимые Турекьяном и Ведеполем [15]. Были обнаружены, кроме того, молибден и серебро, но количественное их определение не производилось. Изученные скважины расположены в нескольких километрах (фиг. 1) к северо-западу от аномальных геологических участков Роуз-Дом и Силвер-Сити, где граниты и перидотиты, встреченные на поверхности и в керне скважин, залегают в метаморфизованных осадочных породах пенсильванского возраста. Метаморфическая зона описана Вагнером [16]; она отмечалась также в работе Франкса [5], который установил, что гранит залегают

в виде ксенолита в перидотитовом штоке, внедрившемся, возможно, в меловое время (участок Роуз-Дом). К востоку от участка Роуз-Дом на границе штатов Канзас и Миссури находится месторождение Биг-Джамбо, одно из первых месторождений свинца, обнаруженных в породах пенсильвания [13].

В 1964 г. Геологической службой был опробован керн пяти неглубоких скважин, пробуренных на участке Роуз-Дом в северо-восточной части округа Вудсон. Оптическим путем в керне этих скважин обнаружены флогопит, пектолит и перидотит, но систематического изучения непрозрачных минералов не проводилось.

В керне двух скважин опробованы минерализованные зоны. Полуколичественный эмиссионный спектральный анализ проб из этих зон показал, что в них содержится 300—1600 млн⁻¹ никеля, причем в 11 из 28 проб концентрация этого элемента превышала 1000 млн⁻¹. Количество хрома (300—1250 млн⁻¹) также значительно превышает его фоновое содержание. Концентрации цинка, свинца, меди, кобальта и серебра сравнимы с их содержаниями в породах из керн четырех скважин, пробуренных в породах миссисипия.

ИЗУЧЕНИЕ ИЗОТОПОВ СВИНЦА

Кэннон и Пирс [1, 2], а также другие исследователи указывали на то, что данные по изотопному составу свинца могут иметь большое значение для геохимических поисков свинцово-цинковых месторождений типа Миссисипи — Валли. Проведенные исследования подтвердили, что изотопный состав свинца из свинцово-цинковых месторождений существенно изменяется от одного района к другому. Кэннон и Пирс, делая сообщение в 1969 г., еще не могли сказать, как нужно использовать изотопы свинца при поисках месторождений в районе Три-Стейт, но они считали, что отношение ²⁰⁶Pb/²⁰⁷Pb, равное 1,38—1,42, является наиболее надежным критерием при поисках крупных рудных тел в районе верховьев Миссисипи. Эти исследователи указывали также, что северные районы Арканзаса, подобно району Три-Стейт, наиболее перспективны для поисков «большой руды». Результаты исследования изотопного состава свинца в образцах, отобранных Геологической службой, показывают, что перспективной можно считать также область на юго-востоке Канзаса и юго-западе Миссури, находящуюся к северу от района Три-Стейт.

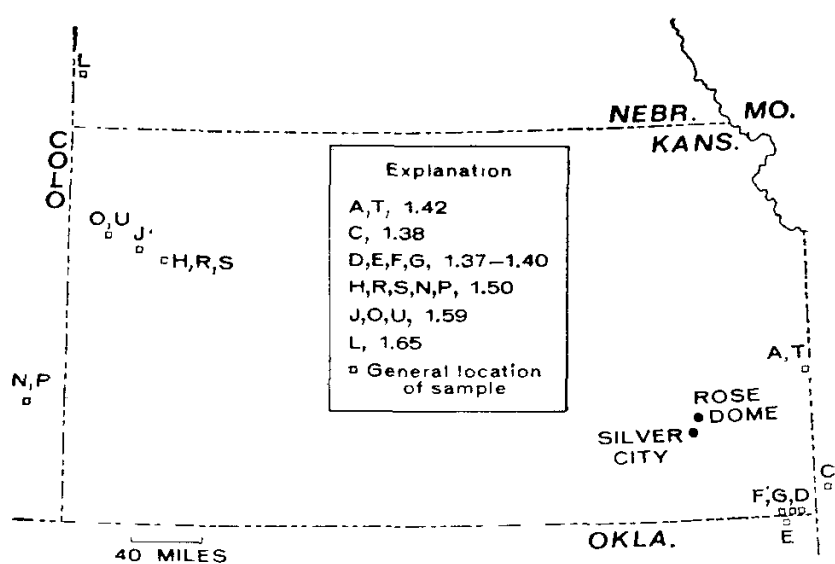
Образцы галенита в виде нерастворимой в уксусной кислоте фракции были отобраны из обнажений и керн скважин на обширной тер-

Таблица I

Изотопные отношения $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ в изученных образцах галенита

Образцы	Характеристика опробованного горизонта	Место отбора образцов, стратиграфическое положение опробованных пород	$^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$
A	Образец с поверхности	Рудник Биг-Джамбо, Канзас, пенсильваний, группа Плезантон	1,42
T	То же		1,41
C	То же	Ороного-Серкл, Миссури, миссисипий	1,38
D	Карьер	Район Три-Стейт, Канзас, миссисипий	1,40
E	То же	Район Три-Стейт, Оклахома, миссисипий	1,39
F	» »	Район Три-Стейт, Канзас, миссисипий	1,37
G	» »	То же	1,37
H	Скважина, глубина 1587 м	Канзас, миссисипий	1,50
R	То же	То же	1,49
J	Скважина, глубина 1560 м	Канзас, миссисипий	1,59
L	Скважина, глубина 1506 м	Небраска, миссисипий	1,65
N	Скважина, глубина 1440 м	Колорадо, миссисипий	1,50
O	Скважина, глубина 1650 м	Канзас, нижний ордовик, группа Арбакл	1,59
P	Скважина, глубина 1426 м	Колорадо, миссисипий	1,51
S	Скважина, глубина 1593 м	Канзас, миссисипий	1,50
U	Скважина, глубина 1655 м	Канзас, нижний ордовик, группа Арбакл	1,59

Примечание. Образцы T, G и R являются дубликатами образцов A, F, H соответственно.



ФИГ. 2. Расположение образцов галенита, в которых определен изотопный состав свинца.

Номера образцов соответствуют их номерам в табл. I.

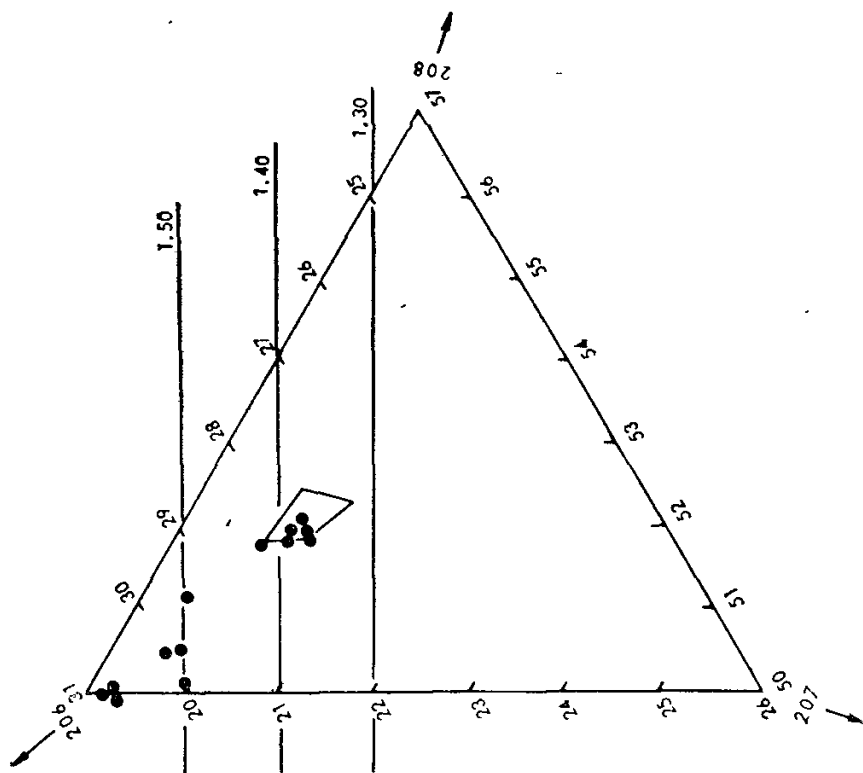
ритории, охватывающей Канзас, Миссури, Небраску и Колорадо (фиг. 2, табл. I). Они взяты в основном из пород миссисипского возраста, лишь один из них представляет породы пенсильванского возраста и один — породы ордовикского возраста. Возраст пород, кроме пенсильванского, достоверно установлен благодаря корреляции с зонами, содержащими конодонты. Все образцы, за исключением образцов A и T (табл. I), были растворены в кислоте. Образцы A, T и C отобраны из обнажений,

а образцы D, E, F, G — из подземных выработок (с глубины 30—50 м) в районе Три-Стейт.

В западном Канзасе и прилегающих участках образцы взяты из пород, содержащих насыщенные солевые рассолы. Анализы изотопного состава свинца (^{204}Pb , ^{206}Pb , ^{207}Pb , ^{208}Pb) выполнены лабораторией в Уэствуде, Нью-Джерси. Повторные анализы всех образцов, кроме C, L и J, показали хорошую воспроизводимость результатов и повысили достоверность данных.

Все изученные образцы содержат J-свинец (так назван свинец, который почему-либо существенно обогащен радиогенными изотопами ^{206}Pb , ^{207}Pb , ^{208}Pb , — по месту первого обнаружения в галените из месторождения Джоуплин в штате Миссури [2]). Изотопное отношение $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ в образцах, взятых из обнажений и карьеров, составляет 21,6—22,5, а в подземных образцах 22,5—27,1. Отношение $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ в образцах из обнажений и карьеров равно 1,37—1,42, а на более глубоких горизонтах величина этого отношения выше 1,49. Образцы из более древних стратиграфических единиц содержат больше радиогенного свинца. Отношение $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$, наиболее важное для поисков руд [2], изменяется в изученных образцах от 1,37 до 1,65 (фиг. 3).

Образцы из месторождения Биг-Джамбо (округ Линн, штат Канзас), разрабатывающегося небольшим карьером в пенсильванских



ФИГ. 3. Треугольная диаграмма изотопного состава свинца ($^{206}\text{Pb} + ^{207}\text{Pb} + ^{208}\text{Pb} = 100\%$) и изотопное отношение $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ в изученных образцах. Образец 11 на диаграмму не нанесен.

породах, содержат свинец с отношением $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$, равным 1,415. Это законсервированное месторождение находится в 120 км севернее района Три-Стейт. Поскольку отношение $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ в пробах одинаково в обоих указанных районах, по нашему мнению необходимы дополнительные работы в этом районе Канзаса и Миссури с целью поисков и оценки крупных потенциально-промышленных свинцово-цинковых месторождений.

Отношение $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ во всех образцах из северо-западного Канзаса, восточного Колорадо и северо-западной Небраски выше 1,49. Наличие J-свинца в палеозойских карбонатных породах этих районов (образцы N, P, H, R, S, J, O, V и L) указывает на то, что свинцовая провинция центральных штатов США протягивается на запад, по крайней мере в восточную часть Колорадо, и на север, в юго-западную часть Небраски. Если распространение свинцовой минерализации таково, то область, расположенная между рудным районом Три-Стейт и вышеназванными участками, также может содержать новые пластовые свинцово-цинковые месторождения. Можно также предсказать, что свинец из палеозойских карбонатных пород в районе, находящемся между Три-Стейт и восточным Колорадо, принадлежит к J-свинцу, а отношение $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ в нем должно изменяться от 1,37 до 1,65.

Из-за большой глубины залегания потенциально рудоносных пластов и незначительности подсчитанных запасов руд в западном Канзасе разработка месторождений в этом районе экономически невыгодна, однако в юго-восточном Канзасе глубина залегания потенциально рудоносных пластов не представляет препятствия для рентабельной добычи руд. В округе Батлер (юго-восточный Канзас) в скважинах нефтяного поля Огаста «в доломитах группы Арбакл (ордовик) и известняках группы Канзас-Сити (пенсильваний) встречено необычайно большое количество минералов, которые могут образоваться в результате привноса гидротермальных растворов» [9]. В свете новых данных по распространению J-свинца перспективы всей области, включающей восточный Канзас, северо-восточную Оклахому и юго-западный Миссури, нуждаются в переоценке. Мы считаем, что новые данные по географическому и стратиграфическому распределению J-свинца подтверждают наш вывод о срочной необходимости проведения работ по оценке потенциальной рудоносности всей территории центральных штатов США.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cannon R. S., Pierce A. P., Isotopic Varieties of Lead in Stratiform Deposits, in Symposium (J. S. Brown, Editor) on Genesis of Stratiform Lead-Zinc-Barite-Fluorite Deposits, Econ. Geol., 1966, Mon. 3, 427—433, 1968.
2. Cannon R. S., Lead Isotope Guides for Mississippi Valley Lead-Zinc Exploration, U.S. Geol. Survey Bulletin, 1321-G, 20, 1969.
3. Evans D. L., Observations on Sphalerite in Southwestern Kansas, Econ. Geol., 43, 685—687, 1948.
4. Evans D. L., Sphalerite Mineralization in Deep-Lying Dolomites of Upper Arbuckle Age, West-Central Kansas, Econ. Geol., 57, 548—564, 1962.
5. Franks P. C., Ozark Precambrian-Paleozoic Relations, Discussion of igneous rocks exposed in eastern Kansas, Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 50, № 5, 1035—1042, 1966.
6. Goebel E. D., Mississippian Rocks of Western Kansas, Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 52, № 9, 1732—1778, 1968.
7. Goebel E. D., Thompson T. L., Waugh T. C., Mueller L. C., Mississippian Conodonts from the Tri-State District, Kansas, Missouri and Oklahoma, in Short Papers on Research in 1967, Zeller (Editor), Kans. Geol. Surv. Bull., 191, Pt. 1, 21—25, 1968.
8. Goebel E. D., Waugh T. C., Angino E. E., Metallic Sulfide Mineralization in Some Mid-Century Paleozoic Cores, in Abstracts with Programs for 1969, Pt. 2, South-Central Section, Third Annual Meeting, The Geological Society of America, 12, 1969.
9. Gott G. B., Hill J. W., Radioactivity in Some Oil Fields of Southeastern Kansas, U.S. Geol. Survey Bull., 988-E, 122, 1953.
10. Lee W., Subsurface Mississippian Rocks of Kansas, Kans. Geol. Survey Bull., 33, 114, 1940.
11. Lovering T. G., Hamilton J. C., Criteria for the Recognition of Jasperoid Associated with Sulfide

Ore, U.S. Geol. Survey Research, 1962, Article 63, C9 — C11, 1962.
 12. Lyden J. P., Aspects of Structure and Mineralization used as Guides in the Development of the Picher Field, Trans. AIME, 187, 1251—1259, 1950.
 13. Schoewe W. H., The First Kansas Lead Mines, Kansas, Historical Quarterly, Topeka, Kansas, 391—401, 1959.
 14. Thompson T. L., Goebel E. D., Conodonts and Stra-

tigraphy of the Meramecian Stage (Upper Mississippian) in Kansas, State Geol. Surv. Bull., 192, 56, 1968.
 15. Turekian K. K., Wedepohl K. H., Distribution of the Elements in Some Major Units of the Earth's Crust, Geol. Soc. Amer. Bull., 72, Table 2, 175—192, 1961.
 16. Wagner H. C., Geology of the Altoona Quadrangle, Kansas, Geologic Quadrangle Maps of the United States, U.S. Geol. Survey, Map GQ-149, 1961.

ПРИМЕНЕНИЕ ИЗОТОПОВ СВИНЦА ПРИ ПОИСКАХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Р. С. Кэннон, А. П. Пирс,
 Дж. К. Антвейлер
 Геологическая служба США,
 Денвер, Колорадо

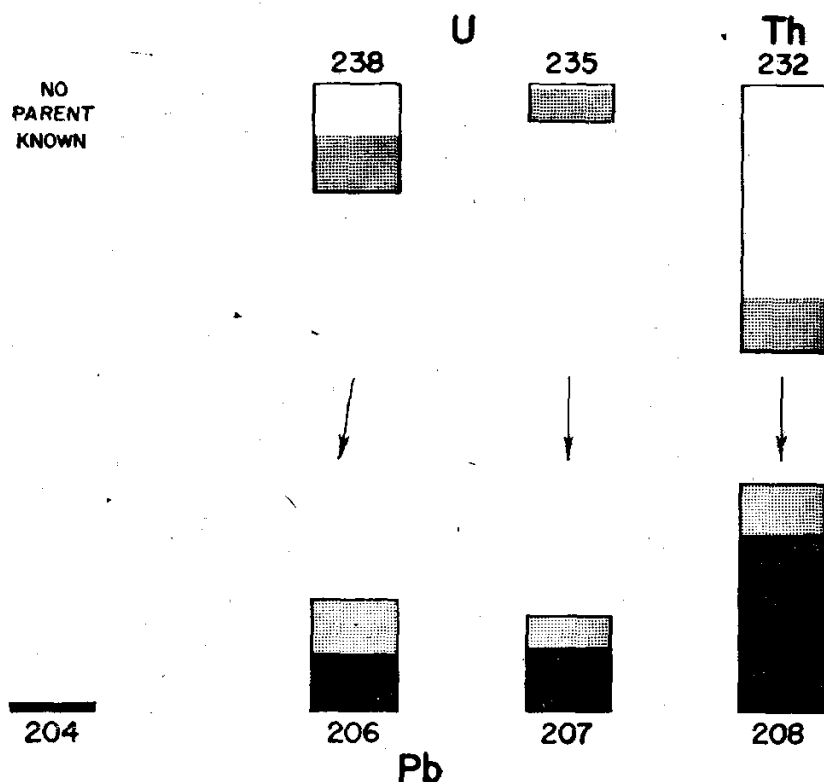
ВВЕДЕНИЕ

Изучение изотопов свинца в геологии начато более 30 лет назад [12]. В результате исследований была получена обширная информация об изменениях изотопного состава свинца в рудах из различных районов мира, что дало возможность использовать анализы изотопного состава свинца для решения практических вопросов, связанных с поисками месторождений полезных ископаемых. Настоящая статья представляет собой обзор возможных способов применения изотопов свинца на основе современных знаний.

ПРИРОДА ИЗМЕНЕНИЙ ИЗОТОПНОГО СОСТАВА СВИНЦА

Баланс вещества по Pb, U и Th в земной коре или мантии представлен на фиг. 1. Четыре колонки в нижнем ряду представляют, по нашим данным, относительное распространение четырех стабильных изотопов свинца в Земле в настоящее время. Черные части колонок соответствуют составу первичного свинца в земном веществе около 4,55 млрд. лет назад. Серые части отражают распад урана и тория (верхний ряд) на стабильные изотопы свинца (нижний ряд) в течение геологического времени, а верхние белые части колонок представляют неразложившиеся атомы ^{238}U , ^{235}U и ^{232}Th , которые еще сохранились в системе; для левой колонки материнский химический элемент не известен. Первичный свинец по этой модели составляет около двух третей всего его количества; остальная треть представлена радиогенными продуктами, образовавшимися в течение геологической истории Земли. Фактически все различия в изотопном составе свинца, которые мы наблюдаем и измеряем в земном веществе, имеют радиогенную природу и обусловлены добавлением новых атомов радиогенного свинца к ранее существовавшим изотопным смесям.

Обычный и аномальный свинец. Изменение отношений трех главных изотопов свинца можно изучать путем нанесения данных на треугольную диаграмму [5]. На фиг. 2 представлена такая диаграмма, на которую нанесено 1280 анализов изотопного состава свинца из содержащих этот элемент минералов. Большинство проанализированных образцов представлены галенитом. Каждый анализ пересчитан на сум-

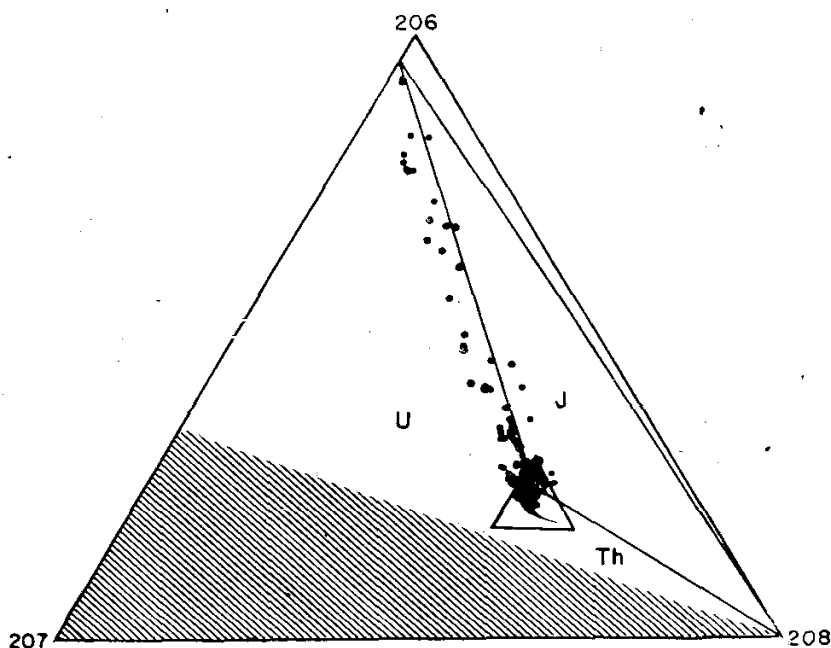


ФИГ. 1. Изотопные соотношения между ураном, торием и свинцом в земной коре.

му $^{206}\text{Pb} + ^{207}\text{Pb} + ^{208}\text{Pb}$, составляющую 100%. Полученные точки располагаются преимущественно на очень ограниченном участке внутри малого треугольника. Они представляют обычный свинец. Небольшое количество точек находится на диаграмме за пределами малого треугольника; они указывают на отклонение изотопного состава свинца от нормы и соответствуют аномальному свинцу. Несколько таких образцов обогащены продуктом распада тория — ^{208}Pb , который назван Th-свинцом. Образцы, обогащенные продуктами распада урана (^{206}Pb и ^{207}Pb), отнесены к U-свинцу, а обогащенные ^{206}Pb и ^{208}Pb образцы по месту их первых находок в Джоппине, штат Миссури, названы J-свинцом.

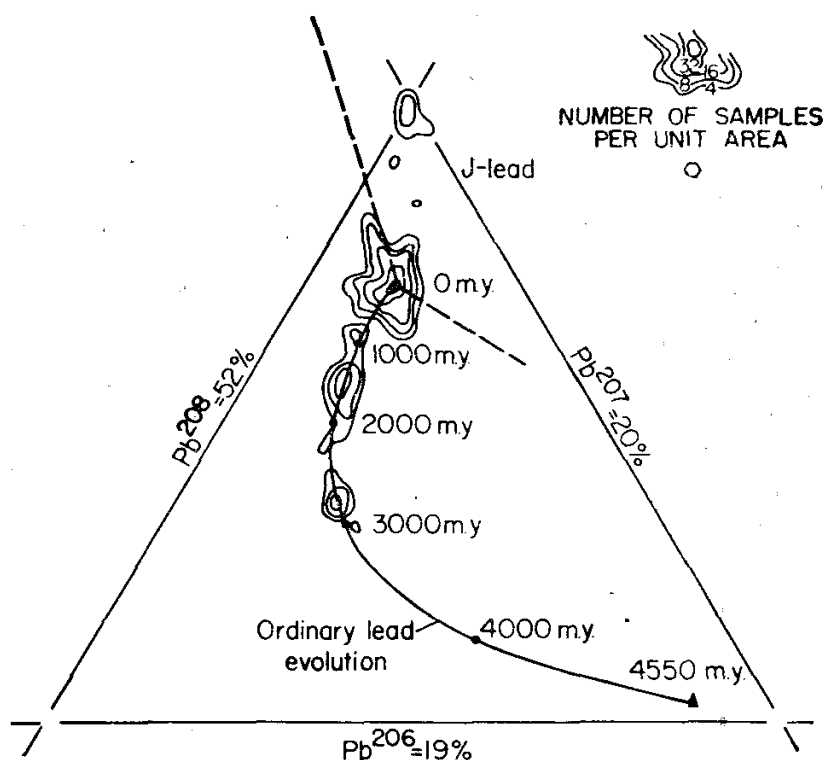
U-свинец, анализы которого расположены на диаграмме выше поля обычного свинца вдоль направления к вершине ^{206}Pb , имеет уникальное значение для специалистов, занимающихся поисками урана, поскольку это свинец, содержащийся в галените урановых месторождений. Если встречен галенит, содержащий U-свинец, то можно считать, что это след урановой минерализации [7].

Эволюция обычного свинца. На фиг. 3 представлены малый треугольник и кривая из фиг. 2, увеличенные в 10 раз. При таком увеличении поля обычного свинца показано расположение более 1200 анализов минералов, содержащих свинец. Затем была проведена кривая, соединяющая участки с максимальной плотностью точек, соответствующих анализам. Это кривая гипотетической эволюции свинца в системе, имеющей возраст 4,55 млрд. лет. Пер-



ФИГ. 2. Изотопный состав свинца из 1280 образцов рудных минералов, выраженный в виде суммы изотопов $^{206}\text{Pb} + ^{207}\text{Pb} + ^{208}\text{Pb} = 100$.

Малый треугольник увеличен на фиг. 3.



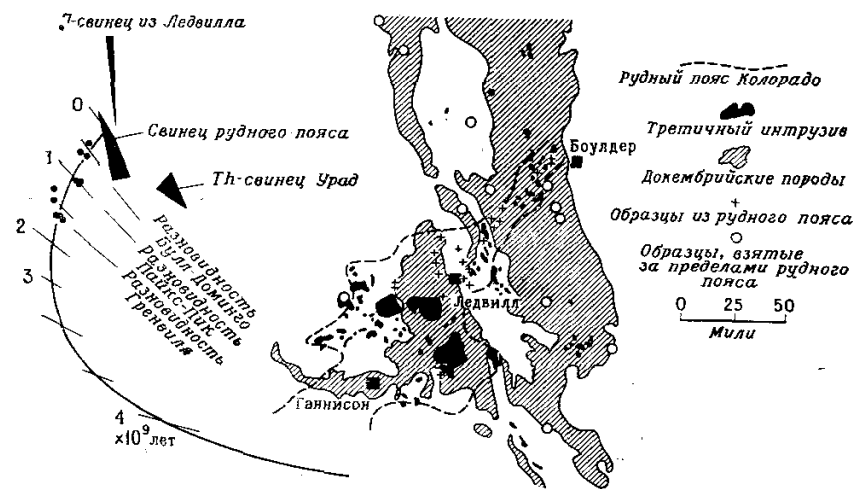
ФИГ. 3. Частота распределения анализов изотопов свинца из различных рудных месторождений.

вичный свинец в системе соответствует свинцу троилита из метеорита Каньон-Дьябло, современное свинцово-урановое весовое отношение принято равным 7,2, а торий-урановое отношение — близким к 4. Эти отношения отражают распространенность рассматриваемых элементов, которая может быть принята для земной коры или мантии.

Примерно 75% проанализированных образцов минералов свинца содержат обычный свинец (точки его изотопного состава находятся на кривой эволюции свинца или вблизи нее). Цифры, указывающие возраст, определены по обычному свинцу, находящемуся в системе. Необходимо отметить большую концентрацию точек около нулевого окончания кривой возрастов. Это свинец из рудных месторождений фанерозоя. Вторая область высокой концентрации точек изотопного состава обычного свинца соответствует возрасту 1500 млн. лет и представляет протерозойские рудные месторождения, залегающие в породах докембрийского возраста. Третья такая область соответствует возрасту около 2850 млн. лет и представляет руды в более древних докембрийских породах.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ ТИПОВ ГАЛЕНИТА ПРИ ПОИСКАХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Выше были рассмотрены разновидности рудного свинца, отличающиеся по изотопному составу. Каждая такая разновидность характеризует определенный тип руд. Простой изотоп-



ФИГ. 4. Рудный свинец из Скалистых гор, штат Колорадо.

На карте показано расположение образцов относительно границ рудного пояса Колорадо, указанных Туэто и Симсом [15]. Слева приведена треугольная диаграмма изотопного состава свинца, показывающая положение изотопных разновидностей свинца на общей кривой эволюции его изотопного состава.

ный анализ свинца можно использовать для установления типа рудопроявления, из которого отобран анализируемый образец. Обнаружение типичного U-свинца в галените указывает на очень высокую вероятность ассоциации этого галенита с урановой минерализацией. J-свинец типичен для крупных свинцово-рудных районов типа Миссисипи-Валли. Если изотопный анализ свинца из галенита располагается внутри двух близких контуров J-свинца на диаграмме, то можно уверенно говорить о том, что рудопроявление имеет нечто общее с такими крупными рудными районами, как юго-восточный Миссури, Три-Стейт и Аппер-Миссисипи-Валли. В противоположность двум указанным выше типам свинца данные анализа обычного свинца, показанные на кривой возрастов около нулевой отметки, дают незначительную информацию о типе рудопроявления, за исключением того, что такое рудопроявление почти наверняка имеет фанерозойский возраст. Разновидность обычного свинца с возрастом около 1600 млн. лет имеет большое значение при изучении крупных сульфидных месторождений Pb, Zn, Cu или Ni в докембрийских породах. Наличие трех последних изотопных разновидностей свинца благоприятно при поисках свинца, поскольку с ними связана примерно третья часть всего добытого в мире свинца. С другой стороны, галенит, содержащий обычный свинец с возрастом около 2850 млн. лет, интересен при поисках золота, поскольку такой свинец найден почти исключительно в месторождениях золота, залегающих в очень древних докембрийских породах.

Генетические типы свинца Скалистых гор, штат Колорадо. В этом районе преобладают две

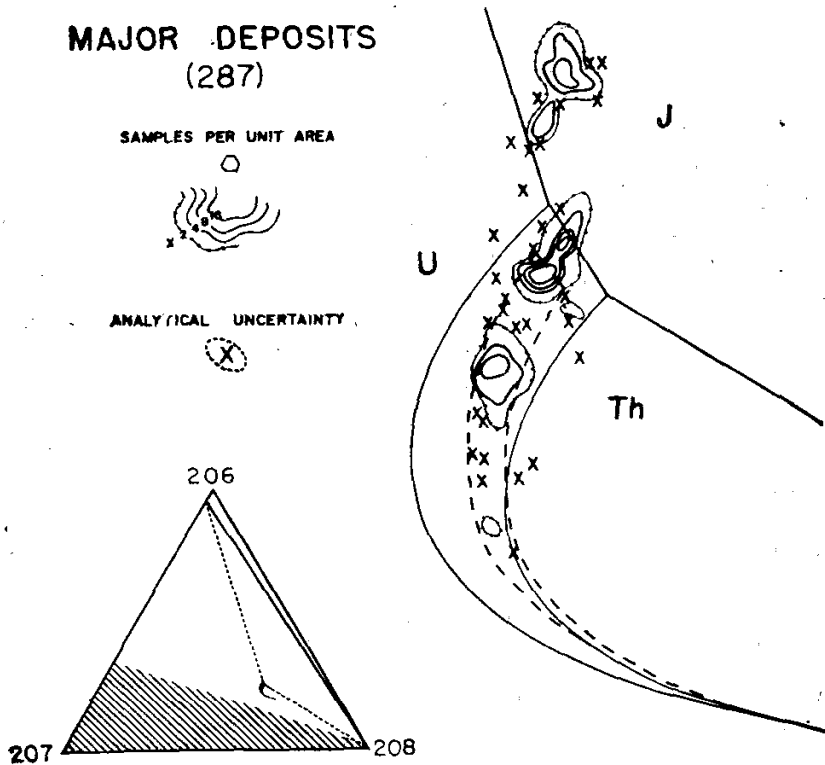
из шести встречающихся разновидностей свинца (фиг. 4). Наиболее обычный тип свинца в рудном поясе Колорадо был установлен в 50 образцах галенита, отобранных как из крупных (Ледвилл, Гилмен и Клаймакс), так и из мелких рудных районов по простиранию рудного пояса от Боулдера до окрестностей Ганнисона. Простой анализ галенита из Скалистых гор, штат Колорадо, сразу показывает генетический тип свинца, характерный для рудопроявлений этого пояса. За пределами рудного пояса автор обнаружил только два образца свинца с аналогичным изотопным составом. Здесь обычен свинец с возрастом 1650 млн. лет, который назван гренвиллской разновидностью. Он распространен в докембрийских массивных или рассеянных сульфидных рудах, залегающих среди докембрийских пород, как, например, на руднике Гренвилл. В течение последних 15 лет месторождения этого типа в Скалистых горах штата Колорадо считаются мелкими, так что при поисках такой изотопный состав свинца нельзя считать благоприятным признаком. В соседних штатах отмечены два крупных месторождения, содержащие свинец с таким же изотопным составом: месторождение золота Хомстейк и медное — Юнайтед-Верде. В некоторых других районах мира свинец с аналогичным изотопным составом встречается в крупных месторождениях, таких, как Брокен-Хилл (Новый Южный Уэльс, Австралия), и в общем составляет около третьей части мировых запасов свинца.

ИЗОТОПНЫЙ СОСТАВ СВИНЦА ИЗ РАЗЛИЧНЫХ ПО РАЗМЕРАМ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

В связи со сказанным в предыдущем разделе возникает вопрос о связи между изотопным составом свинца и размерами месторождений. Как показано ранее, единичный изотопный анализ позволяет установить тип минерализации и ассоциацию металлов, а также генетическую связь оруденения с определенной стадией минералообразования или металлогенической эпохой. Сейчас ставится вопрос о возможности установить потенциальные размеры открытого рудопроявления исходя из данных единичного изотопного анализа.

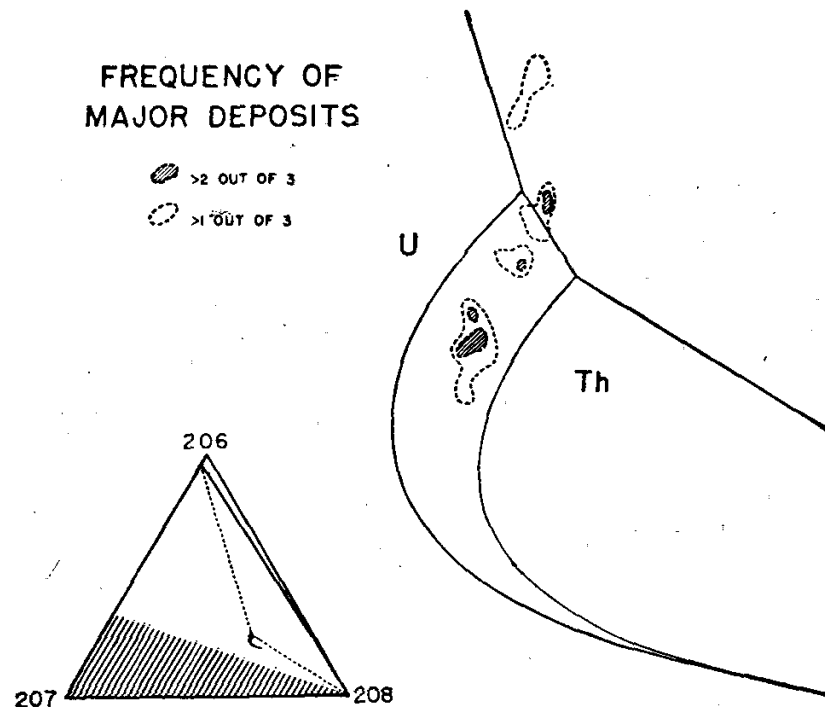
Изотопный состав свинца в крупных месторождениях и мелких рудопроявлениях. Фиг. 5 довольно точно повторяет фиг. 3, но на ней нанесено распределение около 300 изотопных анализов свинца из крупных месторождений или рудных районов, в то время как на фиг. 3 показано распределение 1200 анализов из всех

MAJOR DEPOSITS (287)



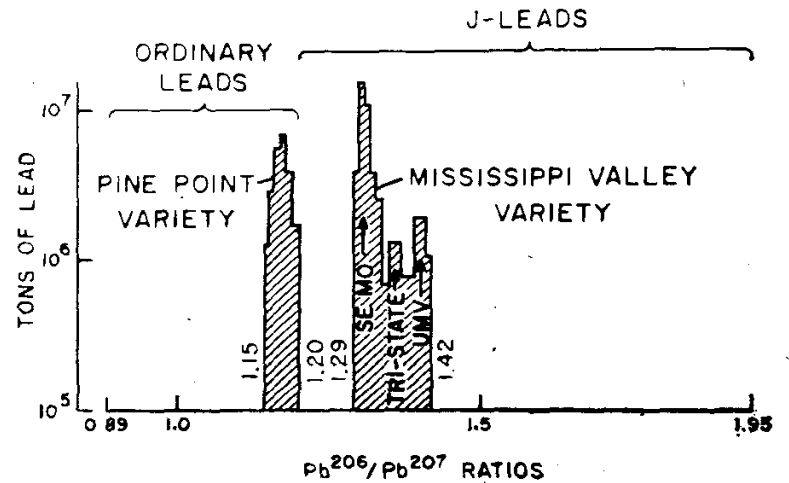
ФИГ. 5. Изотопные разновидности рудного свинца из крупных месторождений.
 Одиночные образцы за пределами самого нижнего контура показаны косыми крестиками. К крупным отнесены месторождения, запасы которых превышают 100 000 т. На фигуре косыми крестиками показано положение образцов на отдельных участках и отмечены неточные анализы.

FREQUENCY OF MAJOR DEPOSITS



ФИГ. 6. Частота распределения изотопных анализов свинца из крупных месторождений.
 Контур показывает соотношение образцов из крупных месторождений и подчеркивают наиболее благоприятный для «большой руды» изотопный состав свинца. Частота крупных месторождений в заштрихованных контурах — более двух из трех, в незаштрихованных контурах — более одного из трех.

типов рудопроявлений — и крупных, и мелких. Взяв отношение крупных месторождений к мелким, отражающее частоту крупных месторождений, мы получаем картину, представленную на фиг. 6. Внутри внешнего контура один

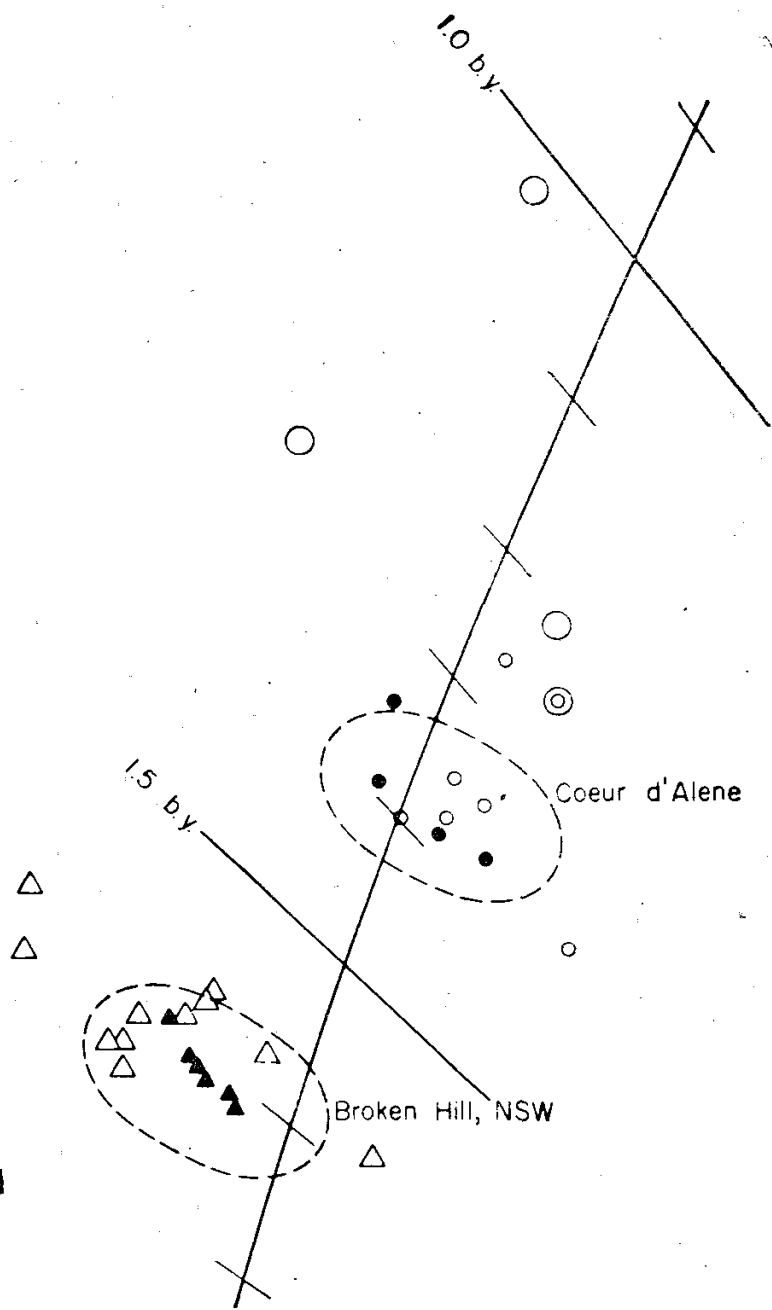


ФИГ. 7. Изотопный состав и запасы свинца в фанерозойских [пластовых свинцово-цинковых месторождениях].
 SEMO — район юго-восточного Миссури; TRI = STATE — рудный район Три-Стейт (Миссури — Канзас — Оклахома); UMV — район Аппер-Миссисипи-Валли (Висконсин — Иллинойс — Айова).

из трех анализов соответствует крупному месторождению, в мелких заштрихованных участках два из трех анализов представляют месторождения или рудные районы, содержащие 100 000 т свинца и более.

Месторождения типа Миссисипи-Валли. На фиг. 7 предпринята еще одна попытка найти связь между изотопным составом свинца и размером месторождений. На этой диаграмме сравнены изотопный состав свинца и его запасы в распространенных по всему земному шару месторождениях типа Миссисипи-Валли, залегающих в палеозойских и мезозойских породах. Распределение точек на диаграмме строго бимодально, причем левый пик представляет 20 млн. т известных запасов свинца, а правый — вдвое больше. Если галенит обнаружен в условиях, близких к условиям залегания месторождений типа Миссисипи-Валли, и изотопный состав свинца попадет в область одного из пиков, то подобное сочетание считается благоприятным индикатором наличия в районе крупного месторождения.

Район Кер-д'Ален. На примере этого района можно проследить, как коррелируются изменения в изотопном составе свинца с размером месторождений в пределах одного рудного района. На фиг. 8 выше изохроны 1,5 млрд. лет нанесено несколько старых анализов свинца из рудного пояса Кер-д'Ален [6]. Черными кружками отмечены образцы из крупных рудников, незакрашенными — из рудников, обладающих меньшими запасами, крупными кружками — рудопроявления галенита, экономическое значение которых не определено. Эллипс показывает пределы ошибки измерения (девять из десяти повторных анализов отдельных образ-



ФИГ. 8. Положение образцов обычного свинца из двух рудных районов на трехлинейной диаграмме относительно вычисленной кривой эволюции его изотопного состава.

В районе Кер-д'Ален (Айдахо) закрашенными мелкими кружками отмечены крупные месторождения, незакрашенными — мелкие месторождения, более крупными кружками — предполагаемые месторождения. В районе Брокен-Хилл, Новый Южный Уэльс, закрашенными треугольниками обозначены крупные месторождения в рудной зоне Брокен-Хилл, незакрашенными — рудопроявления с минерализацией типа Брокен-Хилл, кроме крупных месторождений рудной зоны Брокен-Хилл. Эллипсом ограничена область рассеяния данных, обусловленная аналитическими ошибками.

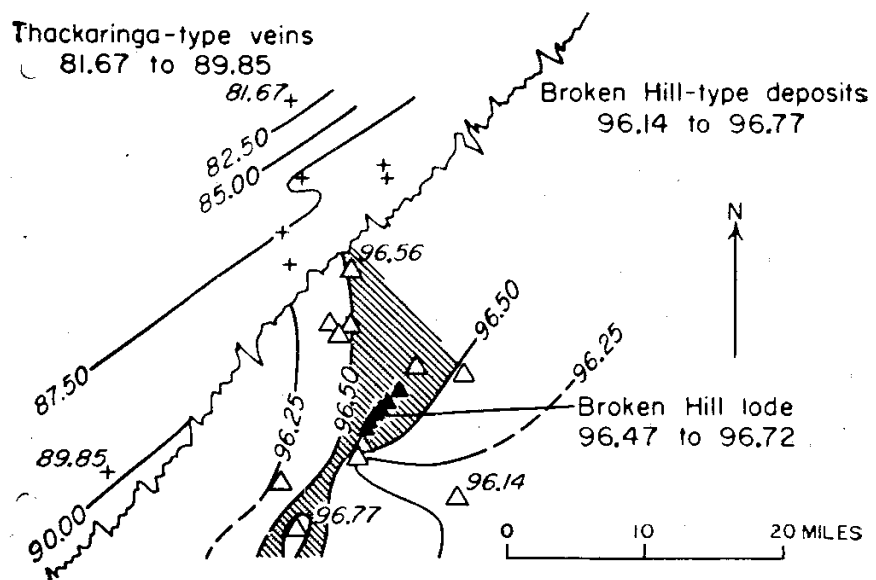
цов лежат внутри этого эллипса). Кружок в верхней части диаграммы представляет галенит из бульдозерной выемки в районе Кер-д'Ален. Рудопроявления, содержащие свинец с таким изотопным составом, для этого района менее перспективны, чем те, у которых свинец имеет изотопный состав, попадающий в пределы эллипса или вблизи него.

Район Брокен-Хилл, Новый Южный Уэльс, Австралия. Данные по этому району [13] нанесены на диаграмму (фиг. 8) в виде треугольни-

ков, расположенных ниже изохроны 1,5 млрд. лет. Закрашенными треугольниками отмечены шесть образцов, взятых на крупных рудниках вдоль рудной зоны Брокен-Хилл. Незакрашенные треугольники представляют образцы из рудников или из рудопроявлений с минерализацией того же типа, но расположенных за пределами этой рудной зоны. В этой связи возникает вопрос о том, могут ли в таком районе существовать градиенты в изотопном составе свинца, которые способствовали бы поискам крупных месторождений. Для решения этого вопроса рассмотрим эти же данные, нанесенные на карту района Брокен-Хилл.

КАРТЫ ГРАДИЕНТОВ ИЗОТОПНОГО СОСТАВА

Брокен-Хилл. На фиг. 9 представлена карта изотопных отношений $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$, увеличенных в 100 раз. Незакрашенными треугольниками отмечены соответствующие образцы, указанные на фиг. 8. Шесть образцов, взятых на крупных рудниках, нанесены произвольно в виде линии закрашенных треугольников, соответствующей поверхности жильной зоны Брокен-Хилл; отношение указанных изотопов изменяется в этой группе от 96,47 до 96,72. Предположим, что участки, характеризующиеся образцами с таким отношением $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$, наиболее перспективны при поисках «большой руды» в этом районе. Пять из лежащих за пре-



ФИГ. 9. Карта отношений изотопов $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ в районе Брокен-Хилл, Новый Южный Уэльс.

Увеличено в 100 раз. Закрашенными треугольниками отмечены образцы из крупных месторождений в рудной зоне Брокен-Хилл, незакрашенными — рудопроявления с минерализацией типа Брокен-Хилл, кроме крупных месторождений рудной зоны Брокен-Хилл. Крестами обозначены образцы из жил типа Такаринга. Серым фоном отмечен участок, включающий образцы с такими же отношениями изотопов, как и в рудной зоне Брокен-Хилл. Ломаной линией показано положение гипотетического контакта двух изотопных разновидностей рудного свинца.

делами жильной зоны рудопроявлений содержат галенит с таким же изотопным составом, и закрашенный в серый цвет участок, ограниченный значениями отношения $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$, равными 96,50 и 96,77, соответственно этому критерию наиболее перспективен для поисков «большой руды».

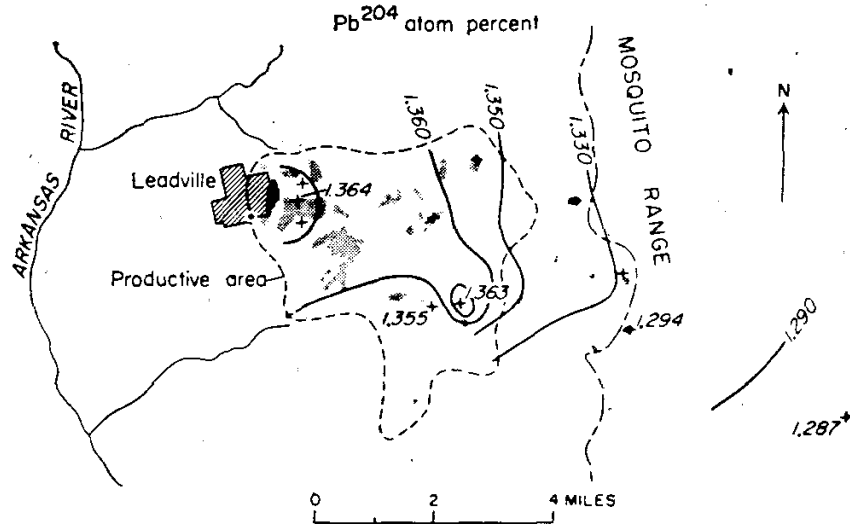
В северо-западной части карты расположены семь анализов галенита из жил типа Такаринга [13]. Это аномальный свинец. Насколько нам известно, среди месторождений этого типа не встречено ни одного крупного рудного тела.

В районах, подобных Брокен-Хиллу и Керд'Алену, основной рудный свинец является относительно гомогенной разновидностью обычного свинца. Поэтому для составления достоверной карты изменения изотопного состава в таких районах точность анализов должна быть выше, чем в приведенных выше случаях, использованных для иллюстрации. В районах, содержащих аномальный свинец, изменения изотопного состава более резкие и гораздо более удобны для составления карт изотопных градиентов. Оба эти типа представлены на карте района Брокен-Хилл (фиг. 9). Изменение отношения $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ для свинца типа Брокен-Хилл составляет всего 0,5%, а для свинца типа Такаринга оно достигает 10%.

Ледвилл. Установлена непрерывная последовательность в изменении изотопного состава от свинца, типичного для рудного пояса Колорадо относительно высокотемпературных мезотермальных месторождений [11], находящихся в центре района, до свинца, близкого к J-свинцу типа Миссисипи-Валли, характеризующему более низкотемпературные мезотермальные месторождения, расположенные в восточной части этого района.

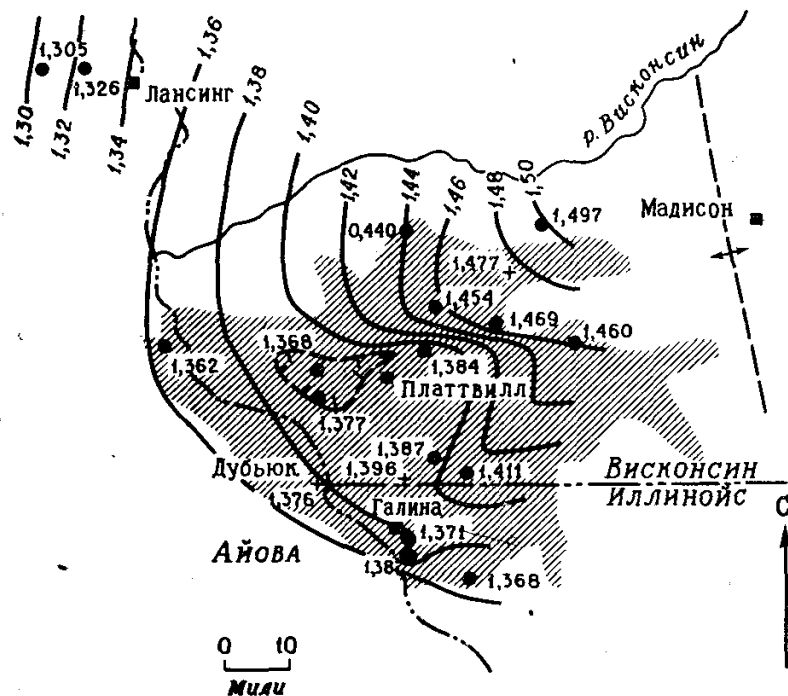
На карте (фиг. 10) наиболее продуктивная часть района оконтурена пунктирной линией [14], а рудничные площади заштрихованы [11]. Мы нанесли на карту содержание изотопа ^{204}Pb (в ат. %) по имеющимся для 10 участков анализам галенита [8]. Эти немногочисленные данные указывают на наличие двух центров минерализации в центральной части района и на резкое понижение содержания изотопа ^{204}Pb к востоку. Изоконцентраты проведены через интервалы в геометрической прогрессии, так что они должны находиться на равных расстояниях, если градиент в содержании ^{204}Pb является результатом процесса смешивания, например, при просачивании рудоносных растворов из центра к краевым участкам. Данные по изотопному составу свинца действительно дают примерно такую картину.

Район Апшер-Миссисипи-Валли. Изменения



ФИГ. 10. Карта концентраций ^{204}Pb в образцах из рудного района Ледвилл.

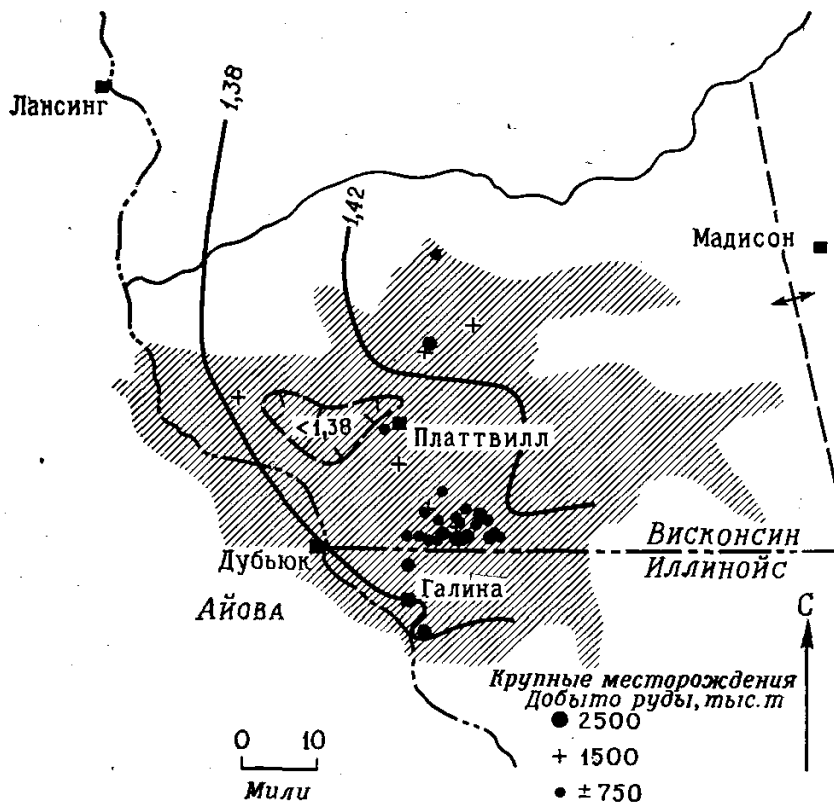
Контуры обозначают градиент изотопного состава свинца. Наблюдается возрастание радиогенного компонента к востоку от центральной части района.



ФИГ. 11. Карта района Апшер-Миссисипи-Валли [10].

На карте приведены отношения $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ и показаны контуры (жирные линии). Кружками указаны данные Хейла и его сотрудников, крестами — данные других авторов.

изотопного состава J-свинца в некоторых свинцово-цинковых рудных районах провинции Миссисипи-Валли также очень удобны для картирования. На карте района Апшер-Миссисипи-Валли (фиг. 11) нанесены данные по отношению $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ для 16 участков, опробованных Хейлом и др. [10]. Линии одинаковых значений этого отношения имеют на карте более или менее концентрический вид. Центральная часть представлена наиболее радиогенным свинцом, находящимся на северо-востоке района. Наблюдается систематическое понижение величины отношения $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ к наименее радиогенному свинцу северо-западной части района,

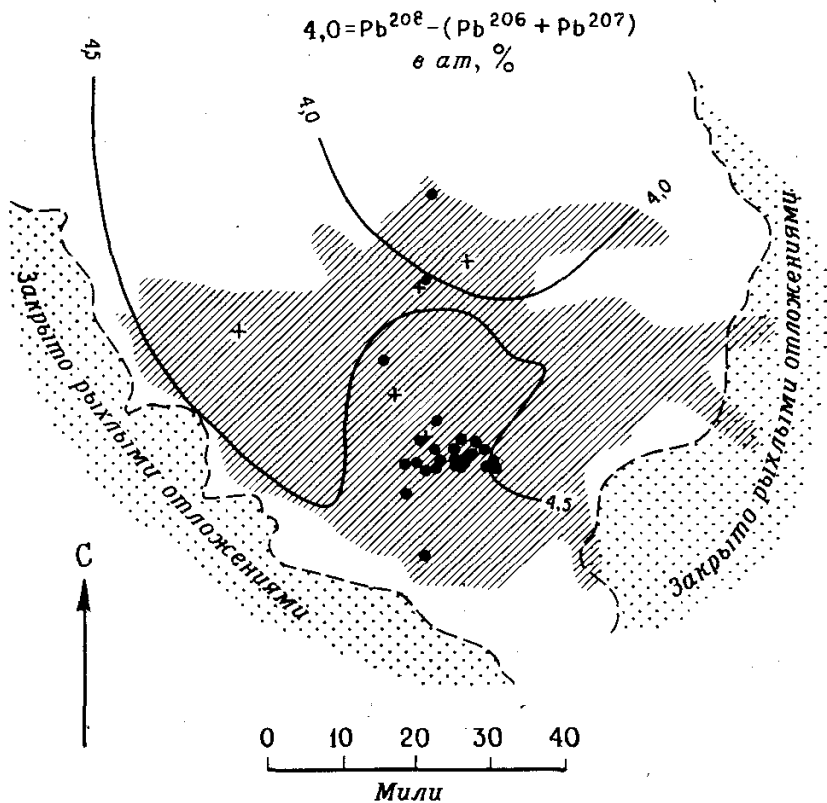


ФИГ. 12. Карта района Аппер-Миссисипи-Валли, показывающая положение крупных свинцово-цинковых месторождений относительно пары контуров отношения $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$.

представленного на карте. Если посмотреть имеющееся описание образцов, то видно, что в образцах, отобранных из 13 мелких рудников и рудопроявлений, отношение $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ изменяется в широких пределах (от 1,30 до 1,50), в то время как в образцах, характеризующих три крупных свинцово-цинковых месторождения, это отношение изменяется только от 1,38 до 1,41. Следовательно, изотопный состав рудного свинца в крупных свинцово-цинковых месторождениях района может изменяться очень незначительно.

Можно провести проверку этой гипотезы, посмотрев, где в районе добывается наибольшее количество руды. На фиг. 12 проведены линии, соответствующие отношению $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$, равному 1,38 и 1,42, и указано положение 30 наиболее крупных свинцово-цинковых рудников этого района (26 из них находятся между указанными линиями). Если принять во внимание и более мелкие рудники, то на участок, расположенный между этими линиями, приходится около 80% всего свинца и цинка, добываемых в районе. Следовательно отношение $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$, равное 1,38 — 1,42, является, видимо, лучшим поисковым критерием при поисках крупных месторождений свинца и цинка в этом районе. Наиболее перспективной для поисков должна быть область, ограниченная указанными выше линиями, а наиболее вероятными направлениями продолжения перспективных площадей — восточное и юго-восточное, на что указывают не замыкающиеся в этих направлениях концы линий.

Мы полагаем, что при оценке перспектив рудопроявлений проверка изотопного состава свинца во всех случаях целесообразна. В то время как на обсуждавшихся выше фиг. 11 и 12 представлено изменение отношений двух изотопов, образовавшихся при распаде урана ($^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$), карта на фиг. 13 отражает распределение изотопов свинца, образовавшихся при распаде тория (^{208}Pb) и урана ($^{206}\text{Pb} + ^{207}\text{Pb}$). Параметр, по которому построена карта, представляет собой разность $^{208}\text{Pb} - (^{206}\text{Pb} + ^{207}\text{Pb})$. Линии на этой карте также имеют тенденцию к концентрическому расположению вокруг наиболее радиогенного образца из северо-восточной части района. Однако в этом случае контур, соответствующий $^{208}\text{Pb} - (^{206}\text{Pb} + ^{207}\text{Pb}) = 4,5$, резко выступает на север и отчетливо проявляет тенденцию к огибанию крупных месторождений. Такая конфигурация линий показывает, какая часть района может быть наиболее перспективной при поисках новых крупных месторождений. Судя по этим данным, наиболее вероятным является южное направ-



ФИГ. 13. Карта района Аппер-Миссисипи-Валли, показывающая положение крупных свинцово-цинковых месторождений относительно контуров, которые отражают изменение параметра $^{208}\text{Pb} - (^{206}\text{Pb} + ^{207}\text{Pb})$ в образцах рудного свинца.

Пунктиром ограничены участки, закрытые рыхлыми отложениями.

ление продолжения рудного пояса. На карту фиг. 13 приблизительно нанесены границы ледниковых отложений [9], чтобы показать, что с геологических позиций логично изучить районы к югу, юго-востоку и юго-западу, где рудные горизонты перекрыты флювиогляциальными отложениями.

РЕКОМЕНДАЦИЯ ДЛЯ ПОИСКОВ СВИНЦОВО-ЦИНКОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ТИПА МИССИСИПИ-ВАЛЛИ

Когда будет составлена карта, отражающая изотопный состав свинца всей рудной провинции Миссисипи-Валли, она станет важным оружием в изучении новых районов. Сейчас еще недостаточно данных для составления такой карты, но в качестве руководства при поисках в рудной провинции Миссисипи-Валли мы можем предложить диаграмму изотопного состава свинца (фиг. 14). Маленький, закрашенный в серый цвет участок на нулевом окончании кривой эволюции возраста, включает все имеющиеся данные по месторождениям Пайн-Пойнт, а также анализы галенита из многих месторождений такого же генезиса в других районах мира. Обнаружение галенита с таким

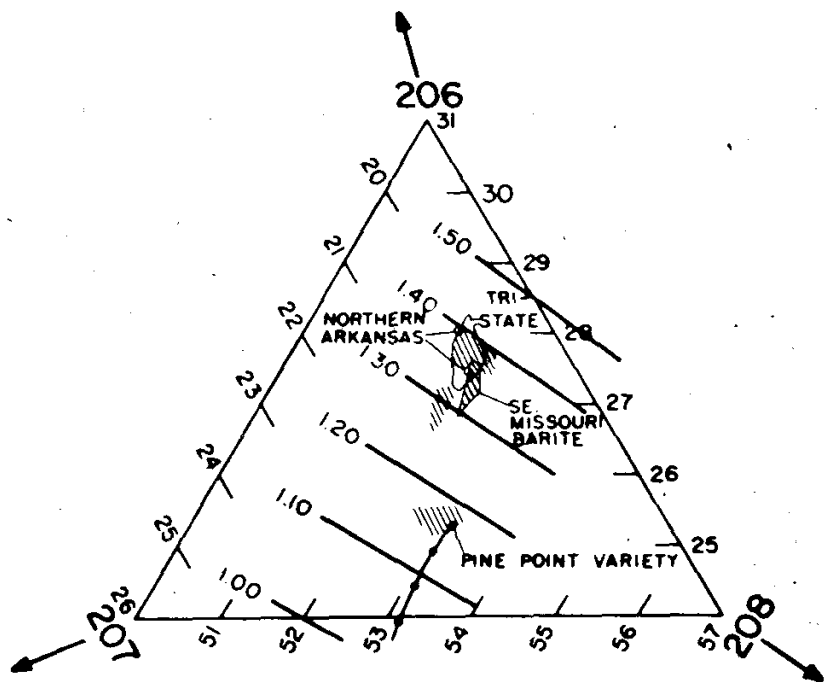
изотопным составом в близких геологических условиях в любом районе мира является надежным критерием наличия крупных месторождений. На четыре участка, закрашенных на диаграмме выше Пайн-Пойнт в серый цвет, приходится основная добыча свинца в долине реки Миссисипи: свинцовый пояс юго-восточного Миссури, свинцово-цинковые районы Три-Стейт и Аппер-Миссисипи-Валли, а также район флюоритовых месторождений Иллинойс — Кентукки. Обнаружение галенита, который по изотопному составу свинца соответствует одному из перечисленных участков или попадает в область, ограниченную этими данными, также является надежным индикатором наличия крупного месторождения. Две выборки анализов по литературным данным (два анализа галенита из свинцово-цинкового района северного Арканзаса [1] и ряд анализов редкого галенита из баритовых месторождений в ордовикских породах юго-восточного Миссури [2]), видимо, соответствуют намеченной закономерности.

ГЕНЕЗИС И ИСТОЧНИК РУД

Как известно, исследование изотопов свинца имеет большое значение для выяснения генезиса рудных месторождений и источника рудных элементов. С этой точки зрения следует подчеркнуть, что любой фактический материал, уточняющий наши представления о генезисе и источнике руд, существенно повышает возможности поисков новых месторождений. Выше мы привели несколько примеров, теперь кратко остановимся еще на двух.

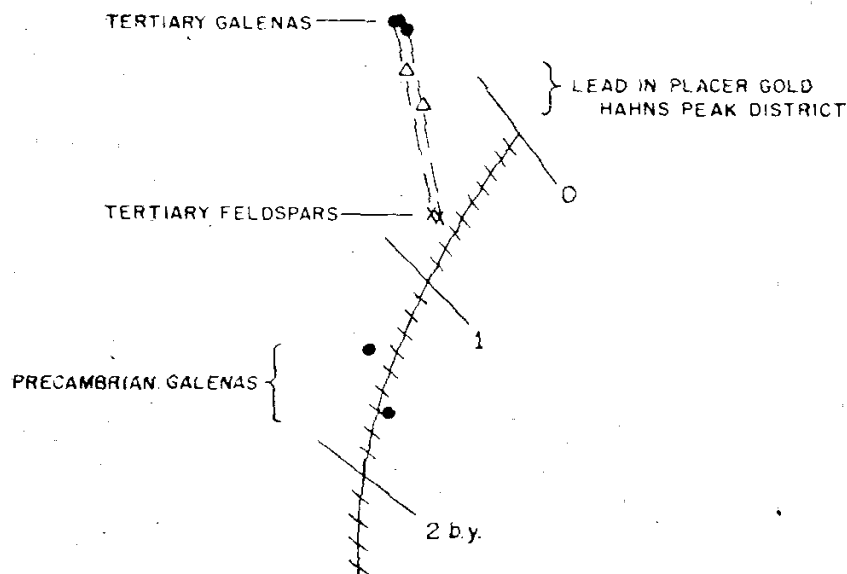
Изотопный состав свинца — наиболее достоверный признак того, что крупные содержащие свинцовую руду жилы района Кер-д'Ален образовались в докембрийское время, а не связаны с внедрением в фанерозое штоков монзонитов Джем, как полагают Кэннон и др. [6]. Значение этого вывода для поисков новых месторождений в районе Кер-д'Ален исключительно велико.

В районе Ханс-Пик северного Колорадо россыпное золото залегает на докембрийских породах, частично перекрытых осадочными породами, прорванными третичными порфирами. В последних пробурены разведочные скважины. Источник золота не был установлен. Им могли быть как жилы в породах докембрийского фундамента, так и минерализация, связанная с третичными порфирами. Антвейлером и его сотрудниками этот район был выбран в качестве первого объекта, на котором для выяснения источника первичного золота был проведен



ФИГ. 14. Сводная диаграмма, показывающая связь между запасами пластовых месторождений и изотопным составом рудного свинца, выраженным в координатах $^{206}\text{Pb} + ^{207}\text{Pb} + ^{208}\text{Pb} = 100$ и в виде отношения $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$.

Дополнительно нанесены данные для поисков: заштрихованный участок представляет данные по району баритовых месторождений юго-восточного Миссури, незакрашенными кружками отмечены пробы из свинцово-цинкового района северного Арканзаса.



ФИГ. 15. Трехлинейная диаграмма изотопного состава свинца, показывающая несомненное сходство свинца в россыпном золоте и свинца пород третичного возраста в районе Ханс-Пик, Колорадо.

изотопный анализ свинца, содержащегося в виде примеси в россыпном золоте. На фиг. 15 показано, что свинец, извлеченный в небольшом количестве из россыпного золота, очень близок по изотопному составу к аномальному свинцу галенитов, связанных с третичным штоком порфиров. Более того, он попадает на линию, соединяющую изотопный состав свинца из галенитов и из полевых шпатов, имеющих в порфирах района Ханс-Пик. В то же время свинец россыпного золота не имеет ничего общего с исследованным рудным свинцом из двух наиболее близко расположенных докембрийских сульфидных месторождений. Эти данные прямо указывают на то, что по крайней мере большая часть россыпного золота в районе Ханс-Пик обусловлена третичной минерализацией, связанной со штоком порфиров.

ВЫВОДЫ

В этом кратком обзоре показаны разнообразные пути применения данных по изотопному составу свинца при поисках месторождений полезных ископаемых. Необходимо отметить, что, за исключением анализов по району Ханс-Пик, ни в одном из приведенных здесь примеров не проводилось изотопного анализа свинца из проб, отобранных с целью поисков месторождений. Можно уверенно сказать, что в будущем, когда образцы будут отобраны и проанализированы специально для решения поисковых проблем, результаты будут еще более впечатляющими. Почти все приведенные в работе изотопные анализы свинца, исключая данные по району Ханс-Пик, представляют галенит, отобранный в рудничных выработках или в процессе разведки во вмещающих породах.

Широкое поле использования изотопного анализа свинца представляют работы по оценке геохимических свинцовых аномалий в водах и почвах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bate G. L., Kulp J. L., Variations in the Isotopic Composition of Common Lead and the History of the Crust of the Earth, Columbia Univ., Lamont Geol. Observatory, Ph. D. dissert., 124, 1955.
2. Brown J. S., Isotopic Zoning of Lead and Sulfur in Southeast Missouri, in Genesis of Stratiform Lead-Zinc-Barite-Fluorite Deposits (Mississippi Valley Type Deposits) — A Symposium, New York, 1966, Econ. Geology, Mon. 3, 410—426, 1968.
3. Cannon R. S., Jr., Pierce A. P., Isotopic Varieties of Lead in Stratiform Deposits, in Genesis of Stratiform Lead-Zinc-Barite-Fluorite Deposits (Mississippi Valley Type Deposits), A Symposium, New York, 1966, Econ. Geology, Mon. 3, 427—433, 1968.
4. Cannon R. S., Jr., Pierce A. P., Lead Isotope Guides for Mississippi Valley Lead-Zinc Exploration, U.S. Geol. Survey Bull., 1312-G, G1-G20, 1969.
5. Cannon R. S., Jr., Pierce A. P., Antweiler J. C., Buck K. L., The Data of Lead Isotope Geology Related to Problems of Ore Genesis, Econ. Geology, 56, № 1, 1—38, 1961.
6. Cannon R. S., Jr., Pierce A. P., Antweiler J. C., Buck K. L., Lead-Isotope Studies in the Northern Rockies, U.S.A., in Petrologic Studies — A volume in honor of A. F. Buddington, New York, Geol. Soc. America, 115—131, 1962.
7. Cannon R. S., Jr., Stieff L. R., Stern T. W., Radiogenic Lead in Nonradioactive Minerals — a clue in the search for uranium and thorium, in United Nations, Proc., Second United Nations Internat. Conf. on Peaceful Uses of Atomic Energy, Geneva, 1958, 2, Survey of Raw Material Resources, 215—223, 1958.
8. Delevaux M. H., Pierce A. P., Antweiler J. C., New Isotopic Measurements of Colorado Ore Leads, in Geological Survey Research 1966, U.S. Geol. Survey Prof. Paper 550-C, C178 — C186, 1966.
9. Heyl A. V., Agnew A. F., Lyons E. J., Behre C. H., Jr., The Geology of the Upper Mississippi Valley Zinc-Lead District (Ill.-Iowa-Wis.), U.S. Geol. Survey Prof. Paper 309, 340, with special sections by A. E. Flint, 1959.
10. Heyl A. V., Delevaux M. H., Zartman R. E., Brock M. R., Isotopic Study of Galenas from the Upper Mississippi Valley, the Illinois-Kentucky and some Appalachian Valley Mineral Districts, Econ. Geology, 61, № 5, 933—961, 1966.
11. Loughlin G. F., Behre C. H., Zoning of Ore Deposits, Leadville District, Colorado, Econ. Geology, 29, № 3, 215—254, 1934.
12. Nier A. O., Variations in the Relative Abundances of the Isotopes of Common Lead from Various Sources, Jour. Am. Chem. Soc., 60, 1571—1576, 1938.
13. Russell R. D., Farquhar R. M., Hawley J. E., Isotopic Analyses of Lead from Broken Hill, Australia, Am. Geophys. Union Trans., 38, 557—565, 1957.
14. Tweto O., Leadville District, Colorado, in Ore Deposits of the United States, 1933—1967, The Graton-Sales Volume, AIME, New York, 1968, I, 682—705, 1968.
15. Tweto O., Sims P. K., Precambrian Ancestry of the Colorado Mineral Belt, Geol. Soc. America Bull., 74, 991—1014, 1963.

ЗНАЧЕНИЕ СТАБИЛЬНЫХ ИЗОТОПОВ ПРИ ГЕОХИМИЧЕСКИХ ПОИСКАХ

М. Л. Дженсен

Университет Юты,
Солт-Лейк-Сити, Юта

ВВЕДЕНИЕ

Геология стабильных изотопов в настоящее время превратилась в отрасль науки, занимающуюся исследованием генезиса минералов. Она нашла широкое применение во многих разделах космологии, а также при геохимических поисках. Это стало возможным в связи с развитием в последние 25 лет масс-спектрологии высокой точности.

Химические свойства изотопов одного элемента одинаковы, но доля их участия в реакциях различна, что и проявляется в естественном изотопном фракционировании. Вариации изотопного отношения $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$ явились главным объектом исследования автора в последние

15 лет. В этой статье сконцентрированы данные об изотопах серы, а также сделаны выводы о применении изотопов кислорода при геохимических поисках.

Первоначально изменения в изотопном составе серы представлялись в виде отношения $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$, но в последние несколько лет принято брать отклонения в частях на тысячу от стандарта, что сходно с записью анализов всех других стабильных изотопов. В случае серы стандартом является триолит из метеорита Каньон-Дьябло. Пространство состава стабильных изотопов серы в метеоритах проиллюстрировано на фиг. 1, где

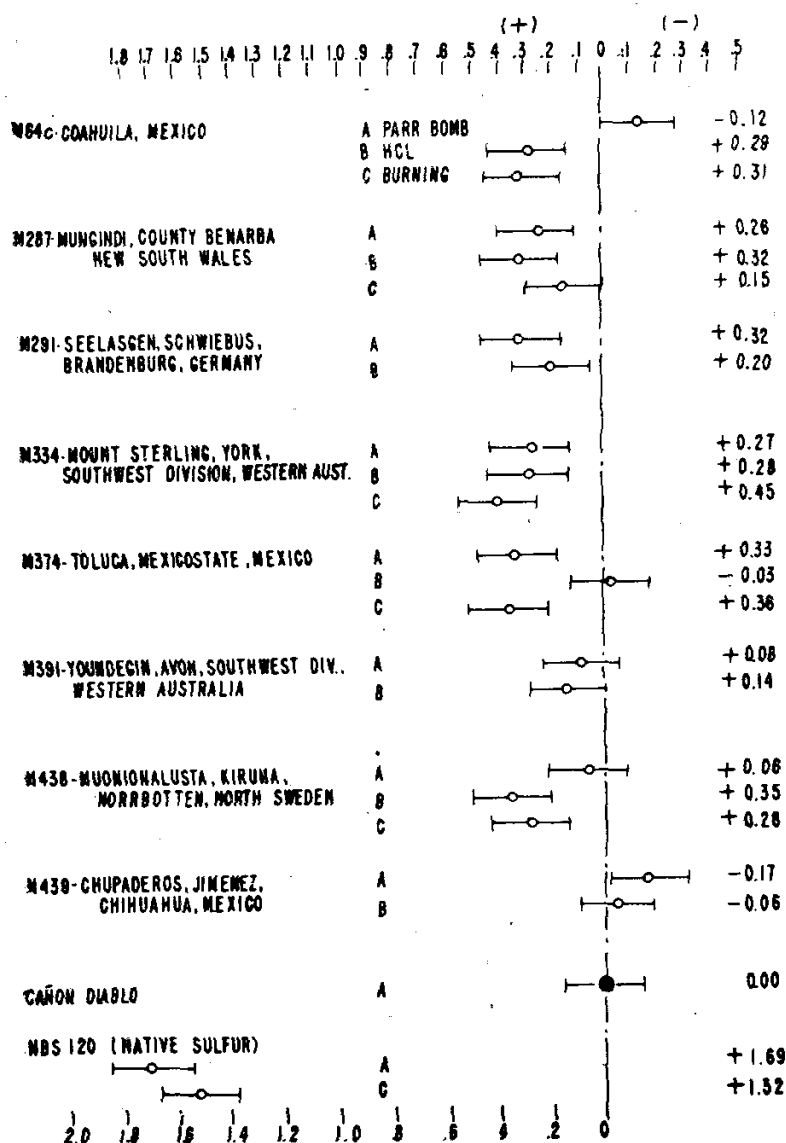
$$\delta^{34}\text{S}^{\text{‰}} = \left[\frac{^{34}\text{S}/^{32}\text{S} \text{ образца}}{^{34}\text{S}/^{32}\text{S} \text{ метеоритового стандарта}} - 1 \right] \times 1000.$$

Величина $\delta^{34}\text{S}$ в различных минералах, содержащих серу, варьирует в пределах, превышающих $130^{\text{‰}}$. Точность измерения составляет около $\pm 0,2^{\text{‰}}$. Такой разброс значений является главным образом результатом бактериогенного изотопного фракционирования и широкого изменения валентности серы от $+6$ до -2 .

БАКТЕРИОГЕННАЯ СЕРА

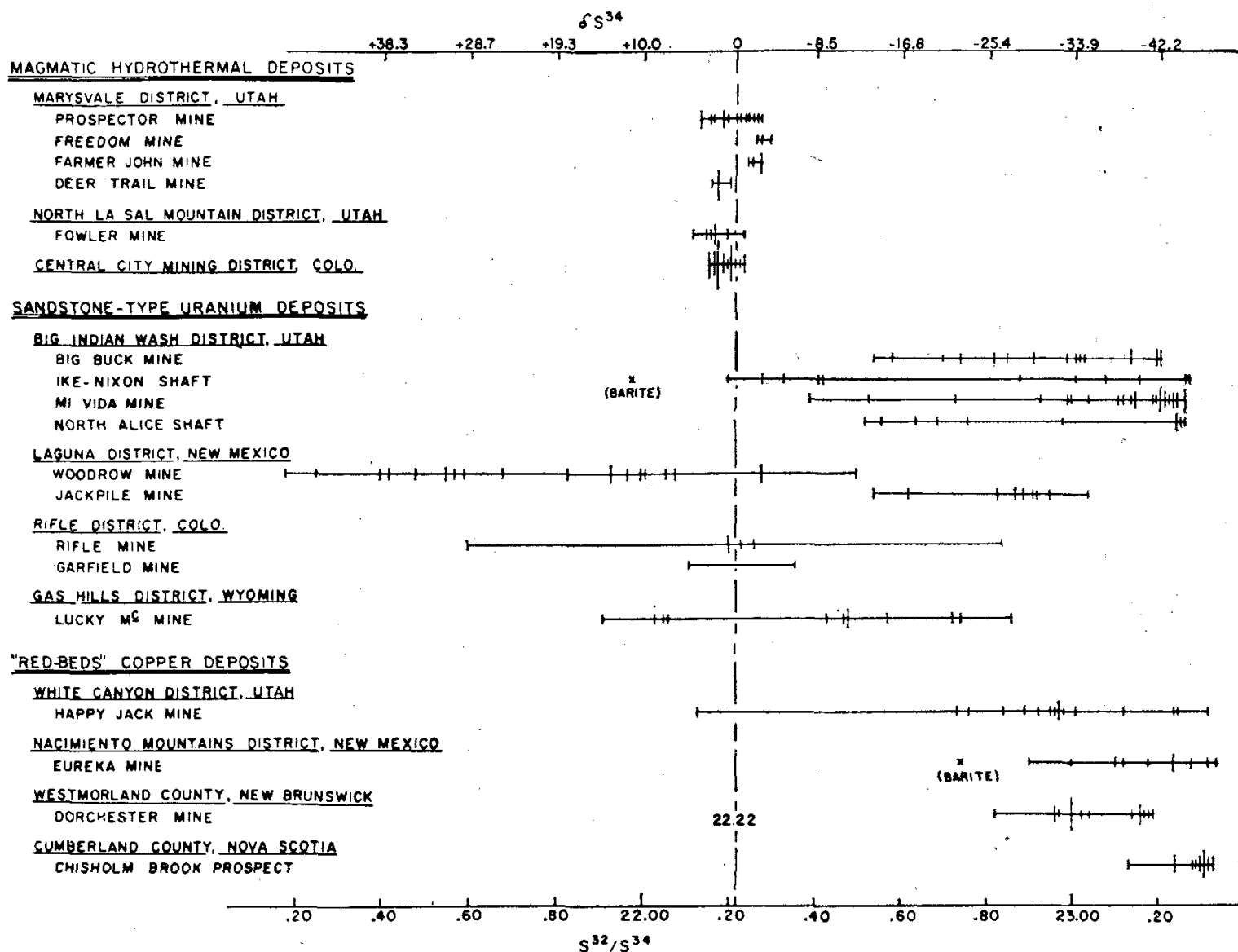
Различие в величине $\delta^{34}\text{S}$ между первоначальным SO_4^{2-} и производной H_2S обратно пропорционально степени обмена, в процессе которого бактерии восстанавливают SO_4^{2-} до H_2S [12]. Если степень восстановления SO_4^{2-} низка, то различие между SO_4^{2-} и H_2S в величине $\delta^{34}\text{S}$ колеблется от 15 до более $30^{\text{‰}}$, причем ^{32}S накапливается в H_2S , а ^{34}S — в SO_4^{2-} . Поскольку степень восстановления серы изменяется, можно указать на две особенности бактериогенной серы: 1) обогащение ^{32}S в H_2S по сравнению с первичным SO_4^{2-} и 2) непостоянство степени этого обогащения.

На фиг. 2 показано отличие по величине $\delta^{34}\text{S}$ серы неорганического происхождения, встречающейся в виде генетически связанных с интрузивными породами сульфидов, от серы осадочных урановых месторождений и месторождений медистых красноцветных отложений. В последних установлено, что H_2S бактериогенного происхождения, образовавшийся путем восстановления SO_4^{2-} бактериями, взаимо-



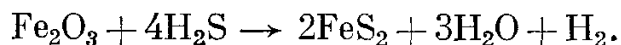
ФИГ. 1. Изотопный состав серы в триолите из метеоритов, выраженный в виде значений $\delta^{34}\text{S}$.

A, B и C — данные, полученные при использовании различных методов анализа.



ФИГ. 2. Изотопный состав серы из послемагматических гидротермальных месторождений, урановых месторождений в песчаниках и месторождений медистых красных песчаников.

действует с имеющимся в осадках Fe^{3+} , окрашивающим вмещающие эти месторождения породы в красный цвет. При этом образуется сульфид двухвалентного железа:

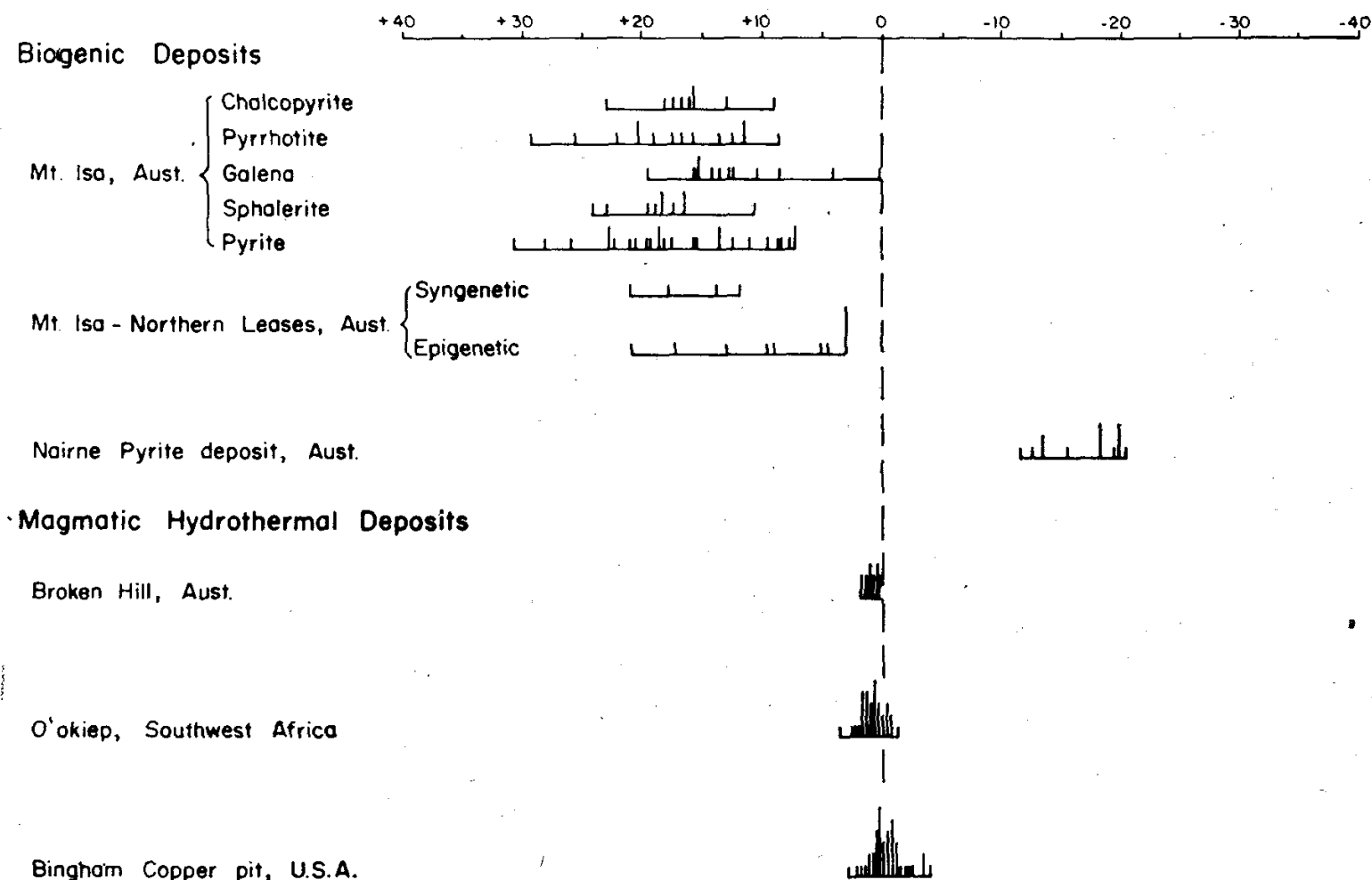


Обесцвечивание красноватых отложений с образованием пирита производится не только сероводородной кислотой, но и ионами U^{6+} , которые, находясь в растворах, могут проникать в зоны, содержащие H_2S , где восстанавливаются сероводородом до относительно нерастворимого U^{4+} (UO_2), при этом происходит осаждение и концентрирование урана. Органический материал, в основном целлюлоза, является в этих месторождениях источником энергии для бактерий.

Следовательно, $\delta^{34}S$ можно использовать в качестве геохимического поискового критерия, чтобы установить преобладал ли бактериогенный сероводород H_2S на данном участке или месторождении и действовал ли он как

восстановитель, способствующий образованию сульфидного месторождения. Таким образом, осадочное происхождение сульфидных месторождений можно установить по величине $\delta^{34}S$ в сульфидах этих месторождений.

Маунт-Айза, Австралия. На фиг. 3 показан изменяющийся изотопный состав серы в сульфидах из свинцово-цинковых и медных месторождений Маунт-Айза. Относительно повышенная изменчивость величины $\delta^{34}S$ очевидна, но обогащения серы изотопом ^{32}S с первого взгляда не заметно. Это, по-видимому, обусловлено морским осадочным происхождением первичного сульфата, величина $\delta^{34}S$ для которого $+10\%$ и более. Поскольку ион SO_4^{2-} восстанавливался бактериями до H_2S в лагунной обстановке, H_2S , обогащенный изотопом ^{32}S , улетучивался. Оставшийся невосстановленным ион SO_4^{2-} в связи с этим постепенно обогащался изотопом ^{34}S , а затем, восстанавливаясь, переходил в H_2S , который также обогащался ^{34}S но в меньшей мере, чем исходный SO_4^{2-} . Следо-



ФИГ. 3. Различия в значениях $\delta^{34}\text{S}$ между бактериогенными и послемагматическими гидротермальными месторождениями.

вательно, теоретически, при отсутствии привноса морских сульфатов в лагуну последняя порция H_2S резко обогащалась изотопом ^{34}S . Это обогащение, судя по данным, представленным на фиг. 3, достигало по крайней мере $+31\%$.

Пиритовое месторождение Нейри, Австралия. В противоположность описанным выше месторождениям на месторождении Нейри [9] наблюдается обогащение изотопом серы ^{32}S , по крайней мере относительно величины $\delta^{34}\text{S}$, характерной для послемагматических гидротермальных месторождений (фиг. 3). Автор считает, что значения $\delta^{34}\text{S}$, полученные для месторождения Нейри, характерны для бактериогенных сульфидов.

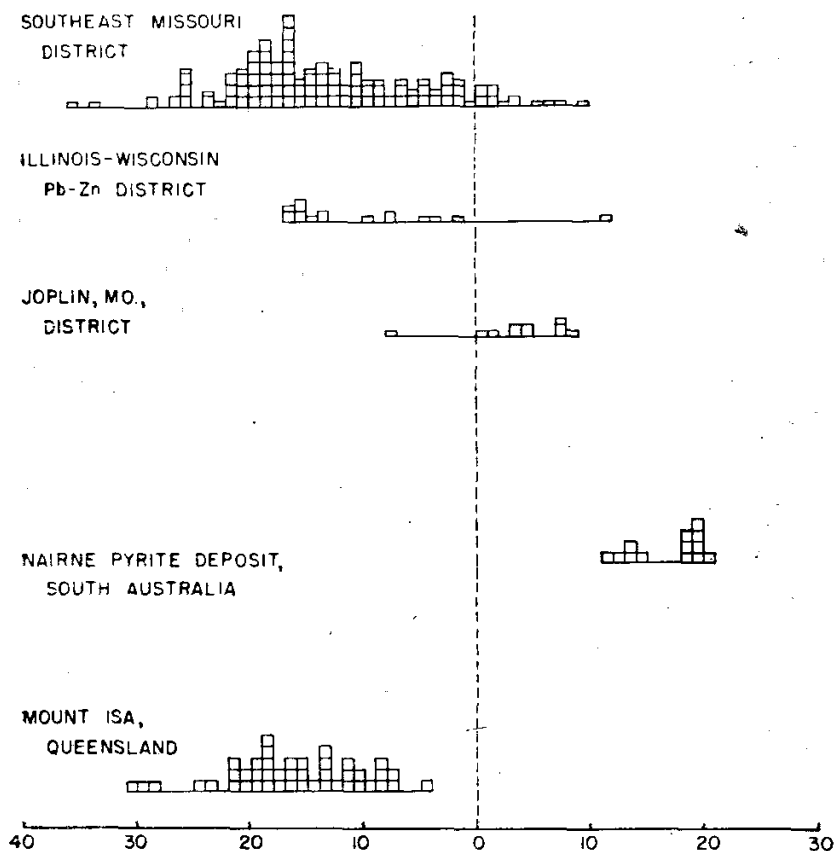
Месторождения типа Миссисипи-Валли.

Существует много точек зрения на происхождение этих месторождений. Однако часто их связывают с биогермами. Возможно, в этих условиях серобактерии восстанавливали SO_4^{2-} , содержащийся в проходящих растворах, предположительно представляющих собою межзерновые воды. При этом образовывался H_2S , который взаимодействовал со следами свинца и цинка, содержащимися в этих или более поздних растворах. В результате постепенно образовывались достаточно крупные кристаллы гале-

нита и сфалерита, характерные для некоторых из этих многочисленных месторождений. Температура их образования, по-видимому, достаточно низка, так что она не оказывала влияния на деятельность бактерий. Поскольку растворы, содержащие SO_4^{2-} , вероятно, обогащены изотопом ^{32}S , следует ожидать, что образующийся H_2S должен характеризоваться большим разбросом значений $\delta^{34}\text{S}$ (фиг. 4) и обогащением изотопом ^{32}S относительно значения $\delta^{34}\text{S}$, свойственного SO_4^{2-} [8].

Необходимо отметить, что месторождения этого типа, видимо, эпигенетические, в то время как сульфиды из месторождений Маунт-Айза (Квинсленд, Австралия) следует считать сингенетическими или по крайней мере диагенетическими. Однако изотопный состав серы тех и других месторождений близок (фиг. 4). Следовательно, для разделения месторождений по типам необходимы другие геологические методы.

Выводы. Приведенные примеры использования величины $\delta^{34}\text{S}$ при геохимических поисках показывают, что анализ стабильных изотопов можно применять наряду с другими геологическими методами для разделения бактериогенных и послемагматических гидротермаль-

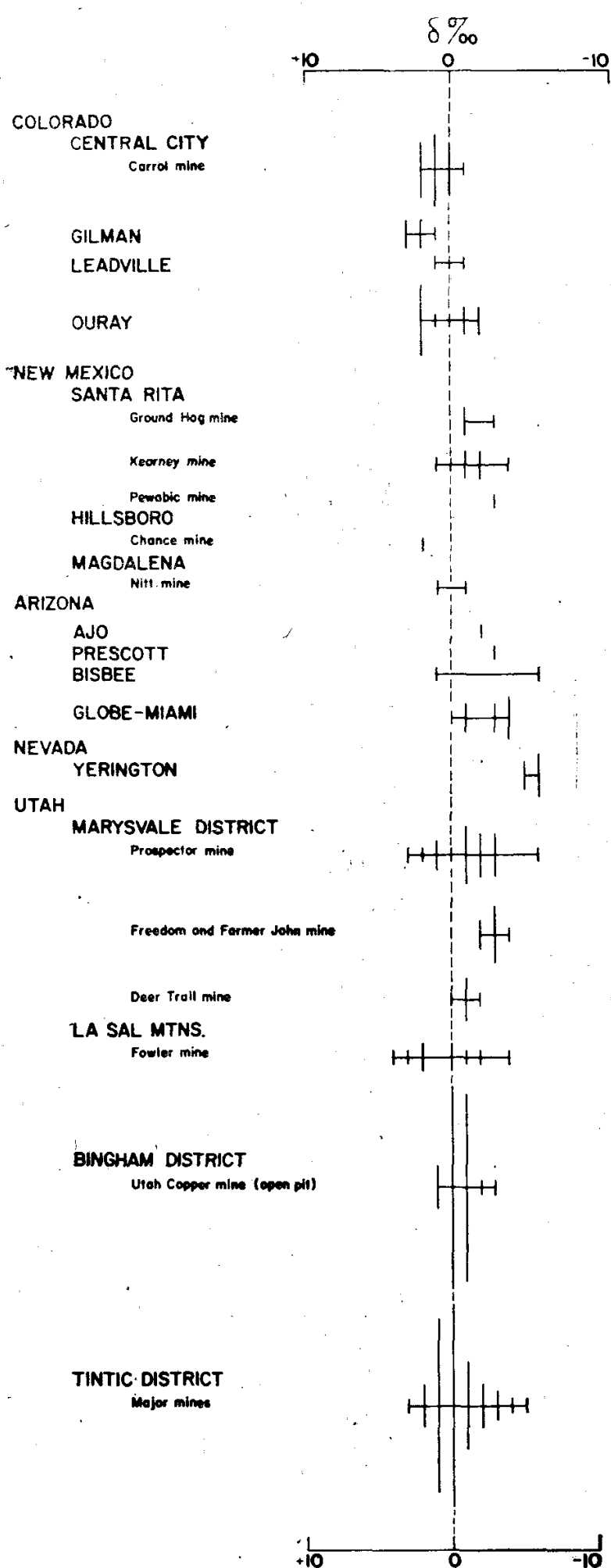


ФИГ. 4. Различия между эпигенетическими и сингенетическими бактериогенными месторождениями (значения $\delta^{34}\text{S}$ для месторождения Миссисипи-Валли взяты из работы Олта и Калпа [1]).

ных сульфидов. Имея данные по изотопному составу серы, можно установить, существуют ли в исследуемом районе биогермы или широко распространенные стратиграфические минерализованные зоны бактериогенного происхождения, а также выявить минерализацию, генетически связанную с интрузивными породами.

ПОСЛЕМАГМАТИЧЕСКИЕ ГИДРОТЕРМАЛЬНЫЕ СУЛЬФИДНЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

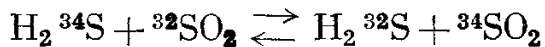
Изотопный состав серы из сульфидов послемагматических гидротермальных месторождений характеризуется очень узким интервалом изменения значений $\delta^{34}\text{S}$. Обычно он близок к нулю, что, вероятно, является результатом гомогенизации минералообразующих флюидов в куполах интрузивов на последних стадиях их кристаллизации. На фиг. 3 и 5 показан этот незначительный разброс величины $\delta^{34}\text{S}$ для гидротермальных месторождений. Следует также указать, что по значениям $\delta^{34}\text{S}$ сера гидротермальных месторождений близка к сере метеоритов. Поскольку изотопный состав серы первичный, она произошла из верхней мантии или нижней части земной коры. В противоположность этому некоторые послемагматические



ФИГ. 5. Изотопный состав серы из кордильерских послемагматических гидротермальных месторождений, выраженный в виде значений $\delta^{34}\text{S}$.

гидротермальные месторождения, такие, как месторождения провинции Нью-Брансуик (Канада) [3], свинцово-цинковое месторождение Агилар в Аргентине (Линарес и Дженсен, неопубликованные данные) и специфичные месторождения Канадского щита, содержат серу, в которой при узких пределах колебаний значения $\delta^{34}\text{S}$ наблюдается обогащение изотопом ^{34}S , причем это обогащение изменяется от 10 до 25‰ и более. Поскольку в осадочной оболочке земной коры преобладают пласты, содержащие сульфаты, которые почти всегда обогащены изотопом ^{34}S , можно полагать, что указанные выше месторождения связаны с интрузивными телами, образовавшимися при плавлении пород земной коры.

Между прочим, как SO_2 , так и H_2S присутствуют в гидротермальных рудообразующих флюидах, и изотопный обмен между этими двумя компонентами происходит соответственно уравнению:

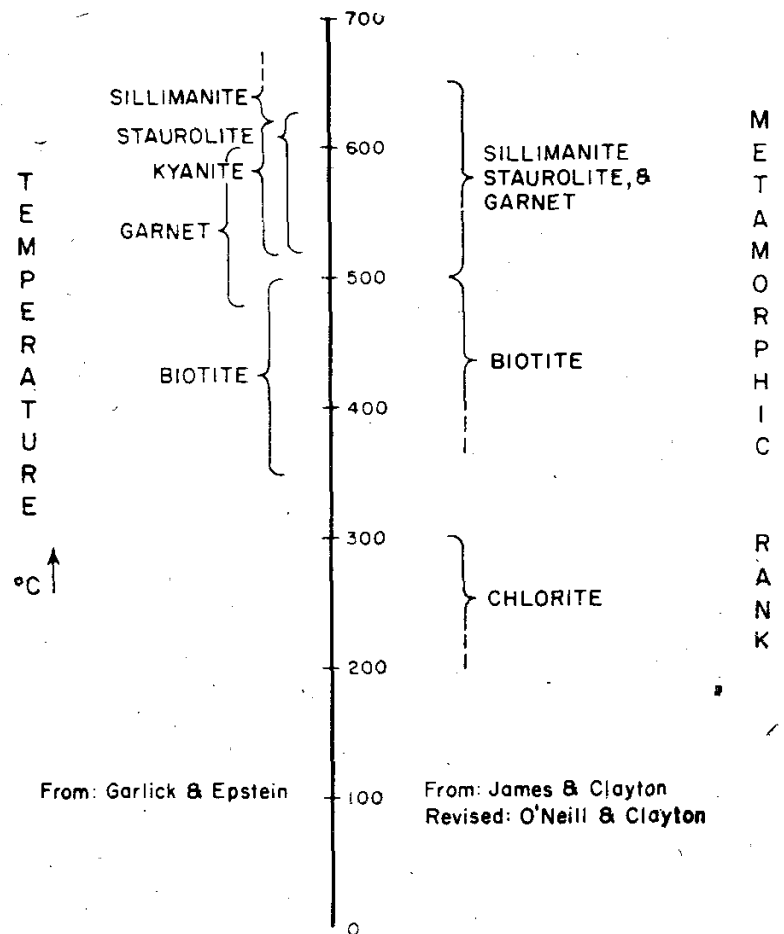


с последующим окислением SO_2 , обогащенного изотопом ^{34}S , и образованием первичных сульфатов. H_2S при этом взаимодействует с металлами и образует сульфиды, обогащенные изотопом ^{32}S . Таким образом, первичные сульфаты легко отличить от вторичных, поскольку сера последних имеет одинаковые с серой первичных сульфидов значения $\delta^{34}\text{S}$ [5].

ИЗОТОПЫ КИСЛОРОДА

Многие рудные минералы являются или сульфидами, или кислородсодержащими минералами. Поэтому при геохимических поисковых работах целесообразно проводить изучение изотопов кислорода. Величина $\delta^{18}\text{O}$ применяется в основном в геотермометрии и для определения происхождения воды в гидротермальных минералах и гидротермальных растворах [2].

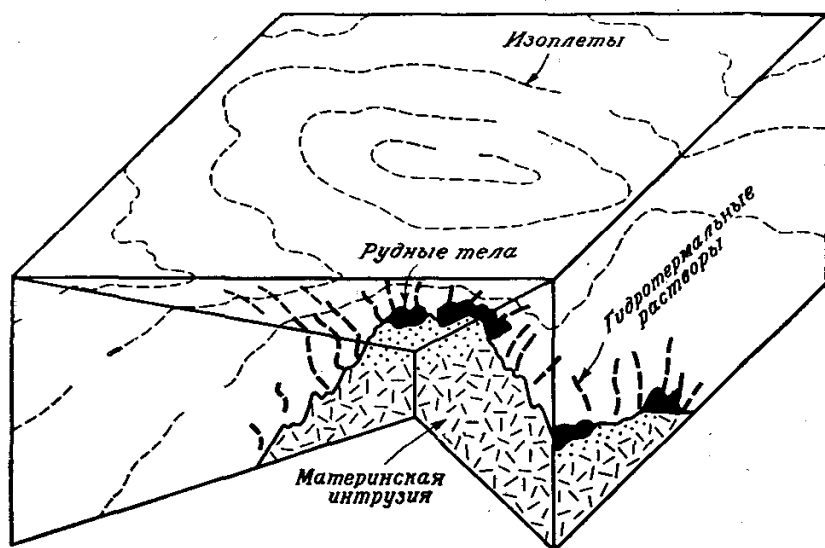
На фиг. 6 показано использование данных по изотопному составу кислорода при изучении минералов метаморфических пород различных ступеней метаморфизма. Изотопные исследования позволяют установить достоверные температуры образования специфичных силикатных минералов, указанных на фиг. 6. Основой для измерения температур является изотопный обмен между кислородом воды и кислородом силикатных минералов в процессе метаморфизма при условиях, вероятно, близких к равновесным [7, 13, 6]. Равновесные реакции изотопного обмена зависят только от температуры, давление не оказывает на них никакого влия-



ФИГ. 6. Применение изотопов кислорода для определения температуры образования минералов при региональном метаморфизме пород.

ния. В присутствии относительно большого количества воды менее распространенный кислород минералов стремится приобрести изотопный состав, соответствующий условиям температуры, реакции изотопного обмена и изотопному составу кислорода воды.

Проведены предварительные исследования величины $\delta^{18}\text{O}$ в гидротермальных глинистых минералах [14] и в гидротермальных доломитизированных или рекристаллизованных карбонатных образованиях. Эти вмещающие породы сопоставлялись с интрузивным телом, являющимся источником гидротермальных флюидов. Гидротермальные изменения уже давно используются как метод поисков месторождений, но изучение $\delta^{18}\text{O}$ дает возможность установить положение изоплет, т. е. линий равных значений $\delta^{18}\text{O}$, указывающих направление к источнику рудоносных растворов [4, 11, 14]. На фиг. 7 представлена идеализированная схема. Предлагаемый метод геохимических поисков нуждается в дальнейшем изучении, согласованном с геологическими полевыми исследованиями. Для оценки удаленности от источника рудоносных флюидов этот метод, видимо, можно использовать на расстояниях, соответствующ-



ФИГ. 7. Идеализированная схема применения $\delta^{18}\text{O}$ для определения источника рудообразующих флюидов.

щих степени проявления гидротермальной доломитизации (обычно несколько тысяч метров).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ault W., Kulp L., Sulphur Isotopes and Ore Deposits, Econ. Geol., 55, 73—100, 1960.
2. Clayton R. N., Epstein S., The Relationship Between $\text{O}^{18}/\text{O}^{16}$ Ratios in Coexisting Quartz, Carbonate and Iron Oxides from Various Geological Deposits, Jour. Geol., 66, 352—373, 1958.
3. Dechow E., Geology Sulfur Isotopes and Origin of the Heath Steele Ore Deposits, Econ. Geol., 55, 539—562, 1960.
4. Engel A. E. J., Clayton R. N., Epstein S., Variation in Isotopic Composition of Oxygen and Carbon in

- Leadville Limestone in its Hydrothermal and Metamorphic Phases, Jour. Geol., 66, 374—393, 1958.
5. Field C., Sulfur Isotopic Method for Discriminating Between Sulfates of Hypogene and Supergene Origin, Econ. Geol., 61, 1428—1435, 1966.
6. Garlick G. D., Oxygen Isotope Ratios in Coexisting Minerals of Regionally Metamorphosed Rocks, Ph.D. thesis, Calif. Inst. Tech., 238, 1964.
7. James H. L., Clayton R. N., Oxygen Isotope Fractionation in Metamorphosed Iron Formations of the Lake Superior Region and in Other Iron-Rich Rocks, Geol. Soc. Am., Buddington, 217—232, 1962.
8. Jensen M. L., Dessay G., The Bearing of Sulfur Isotopes on the Origin of Mississippi Valley Type Deposits, Monograph 3, ed. John Brown, Econ. Geol., 400—409, 1967.
9. Jensen M. L., Whittle A., Sulfur Isotopes of the Nairne Pyrite Deposit, South Australia, Mineral. Deposita, Berl., 4, 241—247, 1969.
10. Linares E., Jensen M. L., Sulfur Isotopic Study of the Aguilar Lead-Zinc Deposit, Argentina, не опубликовано.
11. Lovering T. S., McCarthy J. H., Friedman I., Significances of $\text{O}^{18}/\text{O}^{16}$ and $\text{C}^{13}/\text{C}^{12}$ Ratios in Hydrothermally Dolomitized Limestones and Manganese Carbonate Replacement Ore of the Drum Mtns., Juab. Co., Utah, USGS Prof. Paper 475B, B1 — B9, 1963.
12. Nakai N., Jensen M. L., Isotopic Fractionation of Sulfur by Anaerobic Bacteria, Raw Culture Laboratory Experiments, Jour. Earth Sci., Nagoya Univ., 8, 181—196, 1960.
13. O'Neill J. R., Clayton R. N., Oxygen Isotopes Geothermometry, in Isotopic and Cosmic Chemistry (Urey Volume), ed. H. Craig and others, Amsterdam, North Holland, 157—168, 1964.
14. Sheppard S. M. F., Nielsen R. L., Taylor H. P., Jr., Oxygen and Hydrogen Isotope Ratios of Clay Minerals from Porphyry Copper Deposits, Econ. Geol., 64, 757—777, 1969.

ПРИМЕНЕНИЕ СТАБИЛЬНЫХ ИЗОТОПОВ ПРИ ГЕОХИМИЧЕСКИХ ПОИСКАХ

М. Шима

Институт химических и физических исследований, Ямато-мачи, префектура Сайтама, Япония

Х. Г. Тод

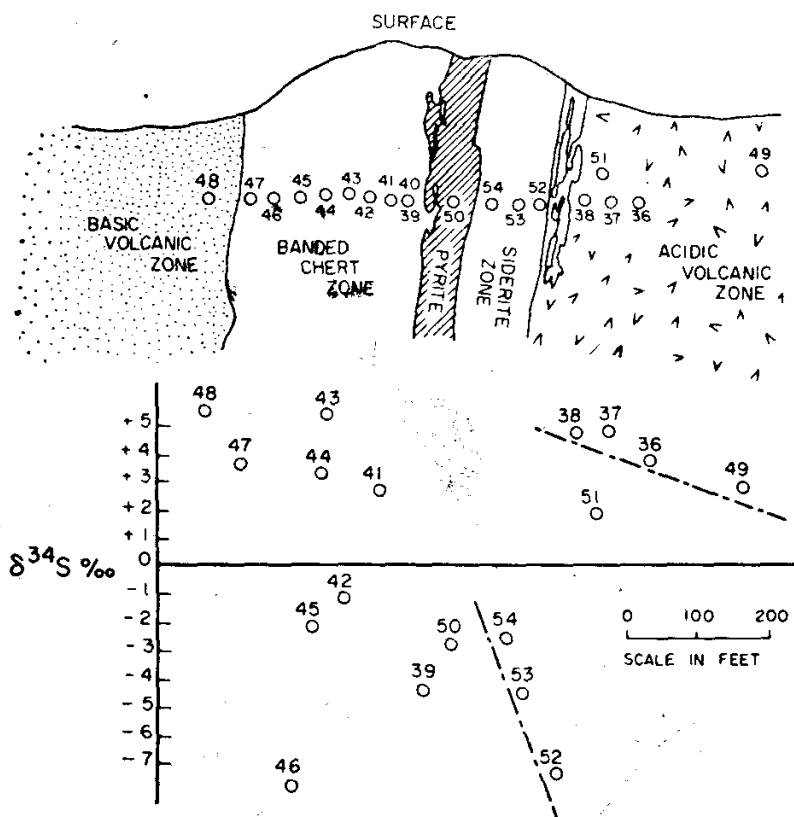
Университет Макмастера, Гамильтон, Канада

ВВЕДЕНИЕ

Многочисленные фундаментальные исследования, касающиеся изотопов серы в сульфидных рудных полях и прилегающих к ним районов [7, 1, 15, 17, 14, 8, 9, 11, 12] явились источником информации о происхождении и условиях образования различных сульфидных месторождений.

Кроме сложной проблемы происхождения и образования сульфидных рудных тел, возникает вопрос о возможности использования изотопов серы при поисках месторождений.

Недавно Холл и Фридман [6] привели данные об изменении содержания ^{18}O и ^{13}C в измененных известняках и доломитах вокруг рудных тел на месторождении Томпсон-Тимберли, Висконсин. Повышение содержания ^{18}O и ^{13}C



ФИГ. 1. Месторождение Гелен.

В верхней части фигуры слева направо показаны зона основных вулканических пород, зона полосчатых кремнистых сланцев, пиритовая зона, сидеритовая зона и зона кислых вулканических пород.

по направлению к рудному телу сопровождалось, по данным этих исследователей, минеральными изменениями во вмещающих породах и изменениями количества микроэлементов в этих породах. Однако содержание ^{18}O и ^{13}C в карбонатных породах около низкотемпературных месторождений типа Миссисипи-Валли, видимо, не имеет практического значения для поисков, поскольку измененные и неизмененные известняки, вмещающие рудные тела, слабо отличаются по содержанию изотопа ^{18}O .

В ходе исследования были определены изотопные отношения серы в сульфидах и содержания малых элементов в пробах, взятых по профилю от рудного тела в измененных боковых породах, и далее в пределах геохимического ореола микроэлементов, а также за пределами изменений и ореолов. Данные, полученные для четырех различных рудных полей, представлены ниже.

Первое и второе рудные поля. Геологическое строение месторождений Ноноваки и Янахара, Япония, одинаково. Сульфидные рудные тела имеют линзо- или пластообразную форму и залегают в основном в сильно метаморфизованных кристаллических сланцах, близких к зеленым сланцам, согласно со сланцеватостью вмещающих пород. Руда представляет собой плотный массивный кристаллический пирит, она часто содержит халькопирит, пирротин и

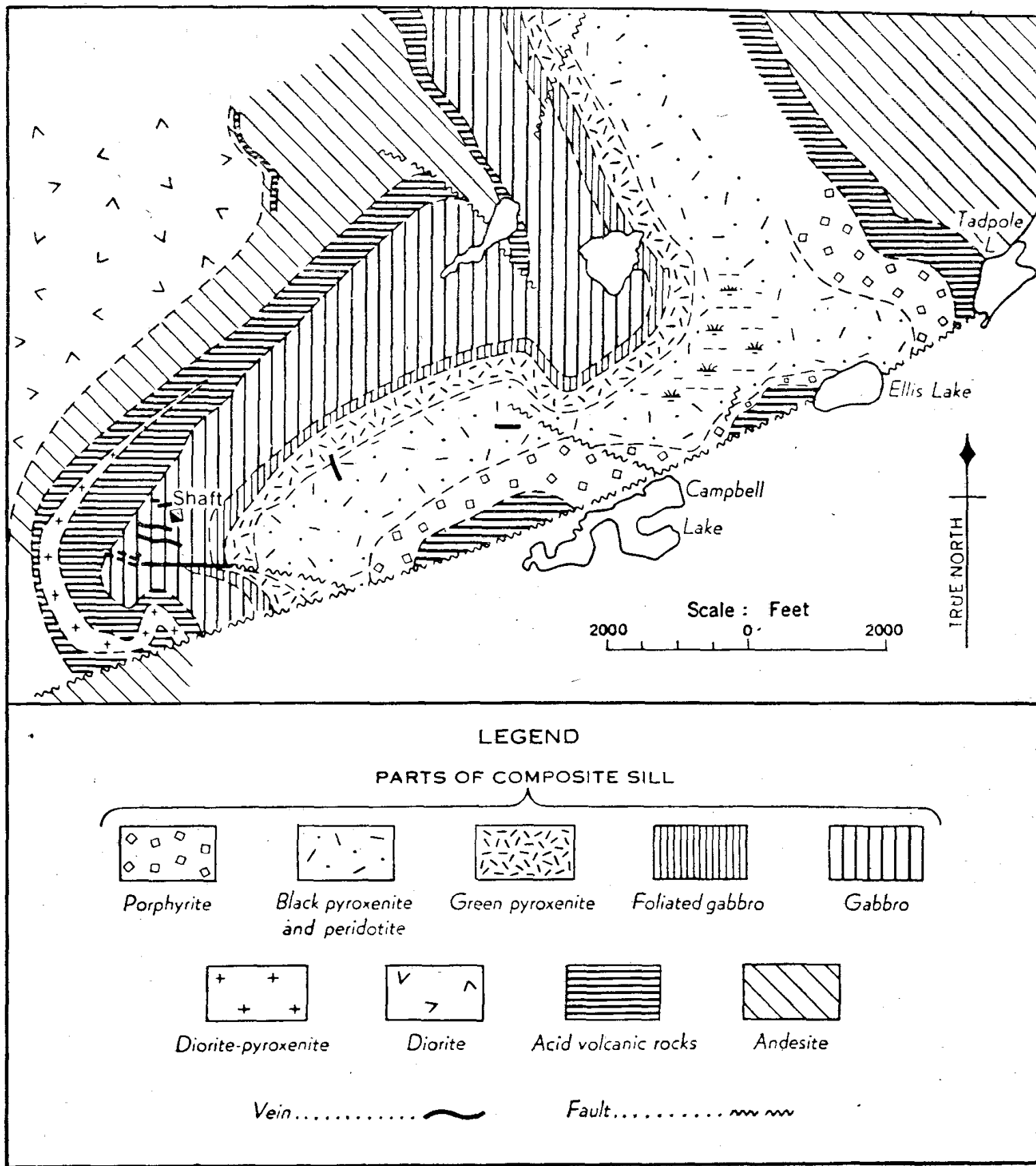
магнетит, а также небольшое количество золота и серебра. Это руды так называемого типа Кислагер.

Третье рудное поле. Месторождение Гелен расположено около озера Бойер в провинции Онтарио, Канада. Рудное тело относится к типу Мичипикотен. Общее геологическое строение района месторождения показано на фиг. 1. Железорудная формация включает в стратиграфическом порядке сверху вниз полосчатые кремнистые сланцы, пиритовый и сидеритовый горизонты. Предполагалось, что пиритовый горизонт, имеющий резкий, частично измененный контакт с полосчатыми кремнистыми сланцами, с глубиной сменяется карбонатным горизонтом. Карбонатный горизонт считается источником всех железорудных месторождений в этом районе. Коллинз и Квирк [2] полагали, что карбонатный пласт образовался при замещении подстилающих лавовых пород, но Янг [18] установил его осадочное происхождение. Согласно наиболее поздним исследованиям [4, 5], сидеритовое рудное тело представляет собой осадочное месторождение вулканогенного происхождения, образованное горячими источниками. Пиритовая зона сидерито-пиритового горизонта имеет мощность от 3 до 15 м.

Четвертое рудное поле. Геологические особенности месторождения Опемиска в районе Шибугомо, Квебек, и расположение изученных образцов сульфидов показаны на фиг. 2. Промышленные сульфидные тела залегают в кварцевых жилах, которые образовались в трещинах, в пределах силла основных пород, состав которых изменяется от пироксенов до габбро. Рудные тела находятся в габбро главным образом в виде жил. В зонах трещиноватости получают развитие явления замещения, и в экзоконтактах жил распространена рассеянная сульфидная минерализация.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Подготовка образцов SO_2 . Образцы весом 100—500 г были тщательно раздроблены, и из них вручную под микроскопом отобран пирит. Он был растворен в смеси концентрированной азотной кислоты и жидкого брома. После выпаривания сульфат переводился соляной кислотой в раствор. Железо в виде $\text{Fe}(\text{OH})_3$ удалялось из раствора путем осаждения аммонием, а сульфат-ион осаждался в виде сульфата бария. Из BaSO_4 , смешанного с HI , H_3PO_4 и HCl , при температуре кипения получали H_2S , который струей азота переносился в уксуснокислый раствор ацетата кадмия, при этом образовывался осадок CdS . Последний азотнокис-

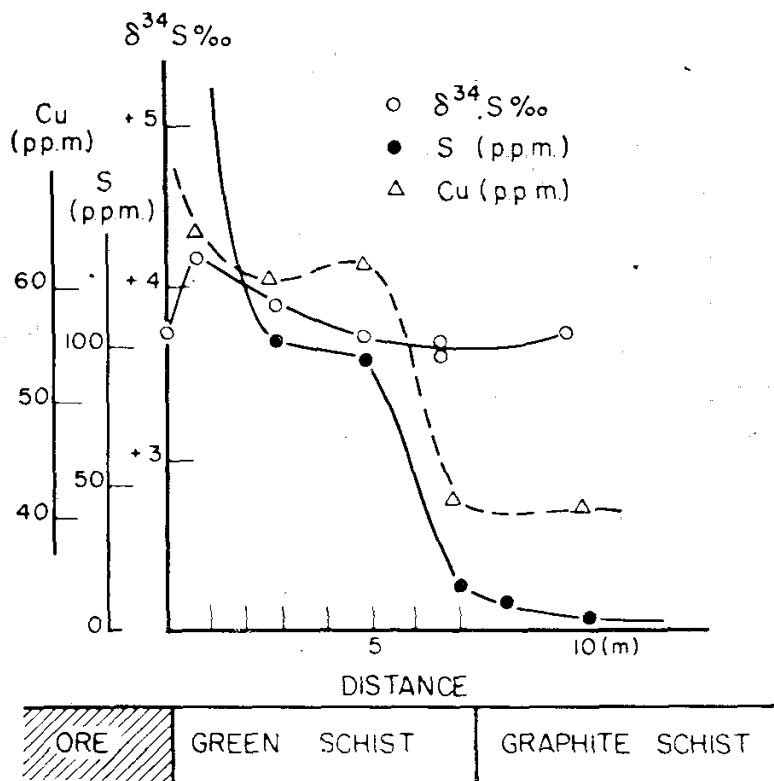


ФИГ. 2. Геологическая карта месторождения Опемиска [3].

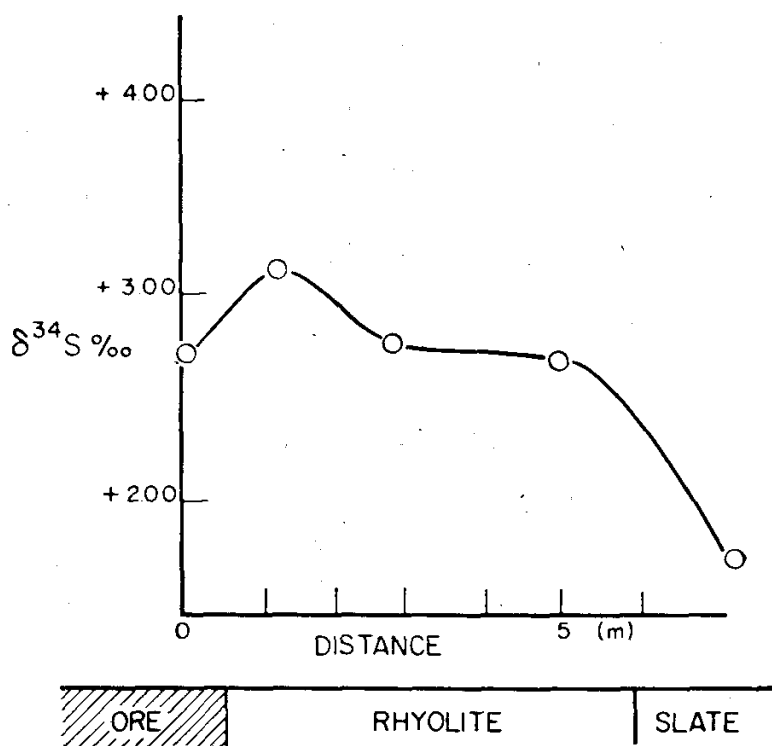
лым серебром переводился в Ag_2S , который сжигался в потоке кислорода при температуре 1350° с образованием SO_2 . Сернистый газ подвергался масс-спектрометрическому анализу. Перед анализом он очищался при помощи фракционной конденсации и дистилляции. Для поддержания постоянной температуры при этом использовались жидкий азот, твердо-жидкий этилхлорид и сухой ацетон.

Масс-спектрометрический анализ. Изотопный анализ выполнялся на высокоточном масс-спектрометре с определением изотопных отношений [16]. Отношения изотопов серы выражены в обычных значениях дельты δ , где

$$\delta^{34S}/\text{‰} = \frac{(^{34}S/^{32}S) \text{ образца} - (^{34}S/^{32}S) \text{ стандарта}}{(^{34}S/^{32}S) \text{ стандарта}} \times 1000.$$



ФИГ. 3. Месторождение Ноноваки.

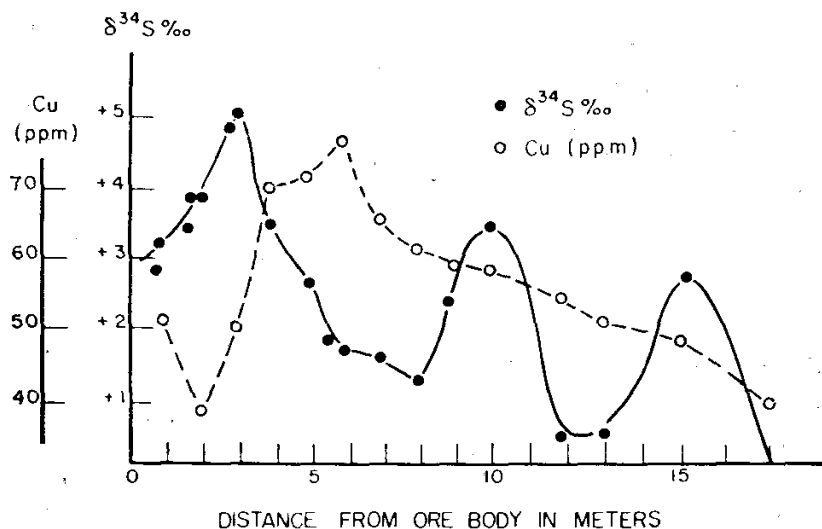


ФИГ. 4. Месторождение Янахара.

Таким образом, $\delta^{34}\text{S}$ в промилле является относительной мерой различия между содержанием ^{34}S в образце и стандарте. За стандартное изотопное отношение взято изотопное отношение серы в триолите из метеорита Каньон-Дьябло.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

На фиг. 1 и 3—6 показаны значения $\delta^{34}\text{S}$, полученные для сульфидов из руд и измененных вмещающих пород, пробы которых отобра-

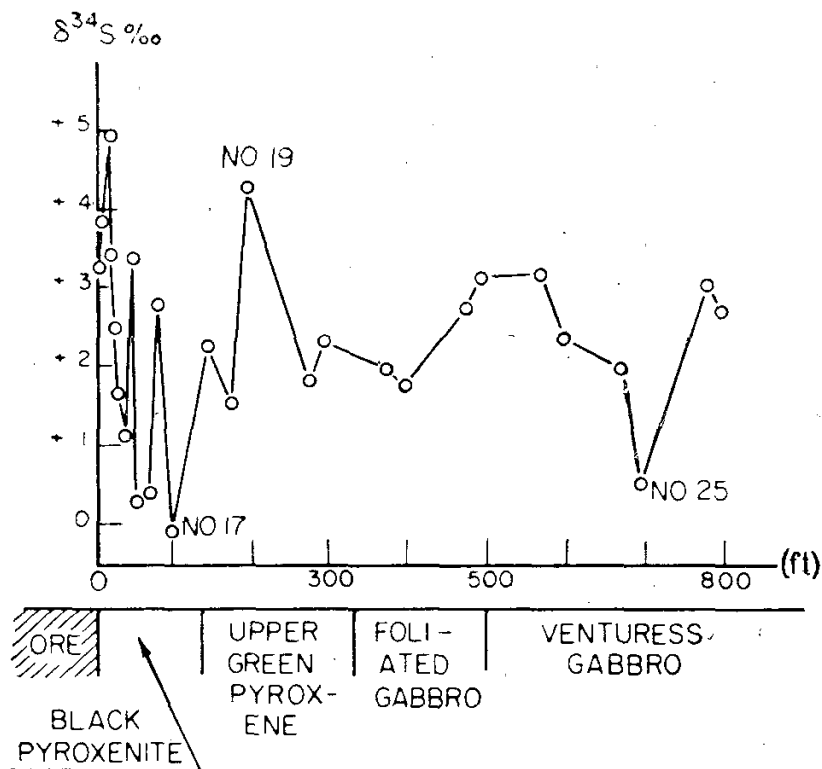


ФИГ. 5. Месторождение Опемиска (а).

ны на различных расстояниях от рудных тел. В пробах пород из месторождения Ноноваки, Япония, обычными методами, применяемыми при геохимических поисках, были определены содержания меди и серы. Эти данные наряду со значениями $\delta^{34}\text{S}$ нанесены на фиг. 3, из которой видно, что содержание серы понижается от жилы к графитовым сланцам на расстоянии около 7 м. Содержание меди и величина $\delta^{34}\text{S}$ также понижаются с увеличением расстояния от жилы. Однако величина $\delta^{34}\text{S}$ понижается не столь резко, как содержания индикаторных микроэлементов. В случае месторождения Янахара (фиг. 4) изотопное отношение серы ($\delta^{34}\text{S}$) отчетливо понижается с увеличением расстояния от рудного тела.

На месторождении Гелен сидеритовая зона и зона кислых вулканических пород характеризуются аналогичным понижением величины $\delta^{34}\text{S}$ с удалением от сульфидного тела (фиг. 1). В кремнистых сланцах не заметно никакой закономерности. Широкие пределы изменения величины $\delta^{34}\text{S}$, наблюдающиеся в зоне кремнистых сланцев, вероятно, маскируют какую-либо закономерность изменения этой величины, которая могла существовать благодаря процессу изменения около пиритовой и сидеритовой зон.

В случае месторождения Опемиска не наблюдается плавного понижения содержания меди и величины $\delta^{34}\text{S}$ с увеличением расстояния от жилы (фиг. 5). Однако отчетливо заметна представляющая интерес корреляция в изменении этих двух индикаторных величин. В габброидных вмещающих породах кривая $\delta^{34}\text{S}$ имеет три пика, которые понижаются с увеличением расстояния от жилы; кривая содержаний меди имеет только один пик. В пробах пород, отобранных на расстоянии более



ФИГ. 6. Месторождение Опемика (6).

30 м от жилы, наблюдается незакономерное изменение величины $\delta^{34}\text{S}$ (фиг. 6).

Можно полагать, что механизм дисперсии изотопов серы такой же, как и для индикаторных элементов, используемых при геохимических поисках. Теоретическое объяснение этого механизма пока отсутствует. Выдвигаются следующие теории: 1) явление Лизеганга; 2) ионный обмен, сопровождающийся хроматографической фиксацией; 3) влияние температуры и давления совместно с влиянием диффузии; 4) химическое равновесие в многокомпонентной системе и др. Изотопный обмен может также оказать влияние на дисперсию содержаний изотопов серы в измененных вмещающих породах. Степень влияния указанного выше фактора зависит от наличия серы в породах не только в сульфидной, но и в других формах, и от условий изотопного разделения серы между этими минеральными формами при образовании месторождений. В связи с этим следует отметить, что присутствие сульфат-иона в изученных породах не определялось. В дальнейшем необходимо провести детальное исследование зависимости содержания сульфата в породах и изотопного отношения серы в нем от расстояния до рудного тела.

Уже сейчас можно сделать вывод, что в процессе изменения вмещающих пород, которое происходит при образовании месторождения, безусловно, имеет место изменение изотопного состава серы. При увеличении расстояния от рудных тел изменение изотопного состава серы в некоторых случаях, видимо, имеет закономер-

ный характер, аналогичный изменению содержания микроэлементов. Необходимы дальнейшие исследования, но уже результаты этой работы показывают, что определение изотопных отношений может быть полезным для поисков скрытых рудных тел в некоторых рудных районах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ault W. U., Kulp J. L., Sulfur Isotopes and Ore Deposits, Econ. Geol., 55, 73—100, 1960.
2. Collins W. H., Quirke T. T., Michipicoten Iron Ranges, Geological Survey of Canada, Memoir № 147, 1926.
3. Derry D. R., Folinsbee J. C., Geology and Structure of the Opemiska Copper Mine, Quebec, CIM Bulletin, № 521, 589—595, 1955.
4. Goodwin A. M., Structure, Stratigraphy and Origin of Iron Formations, Michipicoten Area, Algoma District, Ontario, Canada, Geol. Soc. Am. Bull., 73, 561—586, 1962.
5. Goodwin A. M., Geochemical Studies at the Helen Iron Range, Econ. Geol., 59, 684—718, 1964.
6. Hall W. E., Friedman I., Oxygen and Carbon Isotopic Composition of Ore and Host Rock of Selected Mississippi Valley Deposits, U.S. Geol. Survey, Prof. Paper 650-C, C140—C148, 1969.
7. Jensen M. L., Sulfur Isotopes and Hydrothermal Mineral Deposits, Econ. Geol., 54, 374—394, 1959.
8. Jensen M. L., Dessau G., Ore Deposits in Southwestern Sardinia and their Sulfur Isotopes, Econ. Geol., 61, 917—932, 1966.
9. Jensen M. L., Sulfur Isotopes and Mineral Genesis, in Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits, edited by H. L. Barnes, Holt, Rinehart and Winston Inc., New York, 143—165, 1967.
10. Jensen M. L., Dessau G., The Bearing of Sulfur Isotopes on the Origin of Mississippi Valley Type Deposits, in Genesis of Stratiform Lead-Zinc-Barite-Fluorite Deposits, A Symposium, Econ. Geol. Publishing Co., Monograph 3, 1967.
11. Ryznar G., Campbell F. A., Krouse H. R., Sulfur Isotopes and Origin of the Quemont Orebody, Econ. Geol., 62, 664—678, 1967.
12. Sasaki A., Krouse H. R., Sulfur Isotopes and the Pine Point Lead-Zinc Mineralization, Econ. Geol., 64, 718—730, 1969.
13. Shima M., Geochemical Prospecting Method for Ore Deposits, Sci. Papers Inst. Phys. Chem. Research (Tokyo), 52, 229—241, 1958.
14. Thode H. G., Dunford H. B., Shima M., Sulfur Isotope Abundances in Rocks of the Sudbury District and their Geological Significance, Econ. Geol., 57, 565—577, 1962.
15. Tupper W. M., Sulfur Isotopes and the Origin of Sulfide Deposits of the Bathurst-Newcastle Area of Northern New Brunswick, Econ. Geol., 55, 1676—1707, 1960.
16. Wanless R. K., Thode H. G., A Mass Spectrometer for High Precision Isotope Ratio Determinations, J. Sci. Instr., 30, 395—398, 1953.
17. Wanless R. K., Boyle R. W., Lowdon J. A., Sulfur Isotope Investigation of the Gold-Quartz Deposits of the Yellowknife District, Econ. Geol., 55, 1591—1621, 1960.
18. Young W. L., The Iron Formation of the Michipicoten Area, Ontario, Ph.D. thesis, McGill University, Montreal, 1953.

ВВЕДЕНИЕ

Аэрогеохимические исследования стали реальностью лишь с появлением высокочувствительного аэрогаммаспектрометра с крупногабаритными NaI (Tl)-кристаллическими детекторами. Посредством измерения чувствительным спектрометром гамма-излучения по линии полета можно определять небольшие вариации содержания калия (по ^{40}K), тория (по ^{208}Tl) и урана (по ^{214}Bi). Спектрометры с малогабаритными кристаллическими детекторами были пригодны лишь для выявления значительных концентраций урана, тогда как система с крупногабаритными кристаллическими детекторами — надежная основа метода аэрогеохимических поисков. Помимо прямых поисков скоплений калия, тория и урана, систематическая аэрофотографическая регистрация гамма-излучения при помощи этого спектрометра позволяет выявлять и другие типы рудных месторождений по связанной с ними радиоактивности.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Радиоактивность как поисковый признак оруденения часто отмечалась в литературе.

Торий и уран в магматических процессах накапливаются в растворах поздних стадий. Это связано с большими атомными радиусами и зарядами тория и урана, что препятствует их вхождению в кристаллические решетки обычных порообразующих минералов, возникающих на ранних этапах кристаллизации магмы. Аналогично и калий может накапливаться в поздних растворах, если он не израсходовался полностью при образовании калишпата и некоторых других порообразующих минералов. На этих поздних этапах становления интрузивов торий и уран могут перераспреде-

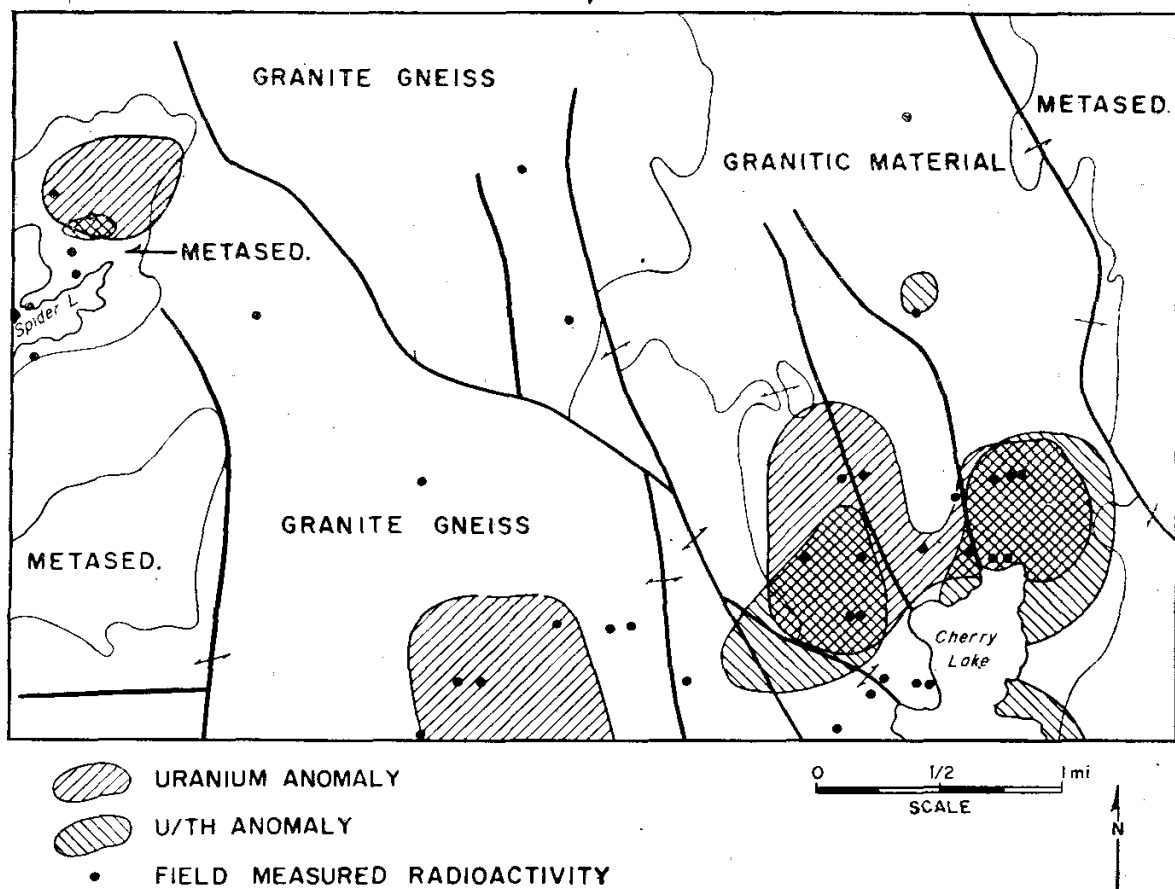
ляться в магме или мигрировать в зоны пониженного давления, например в участки формирования пегматитов. В процессе такой транспортировки торий, легко восстанавливающийся и осаждающийся, часто разделяется с ураном.

Торий и уран относятся к числу элементов, наиболее легко мобилизующихся при метаморфизме в связи с преимущественной приуроченностью к межзерновым пространствам пород. Несколько позднее осуществляется мобилизация калия, входящего преимущественно в состав порообразующих минералов. Эти особенности поведения калия, урана и тория обуславливают возможность оценки степени метаморфизма в данном районе при аэрогаммаспектрометрических исследованиях, что реально и было проверено при съемках.

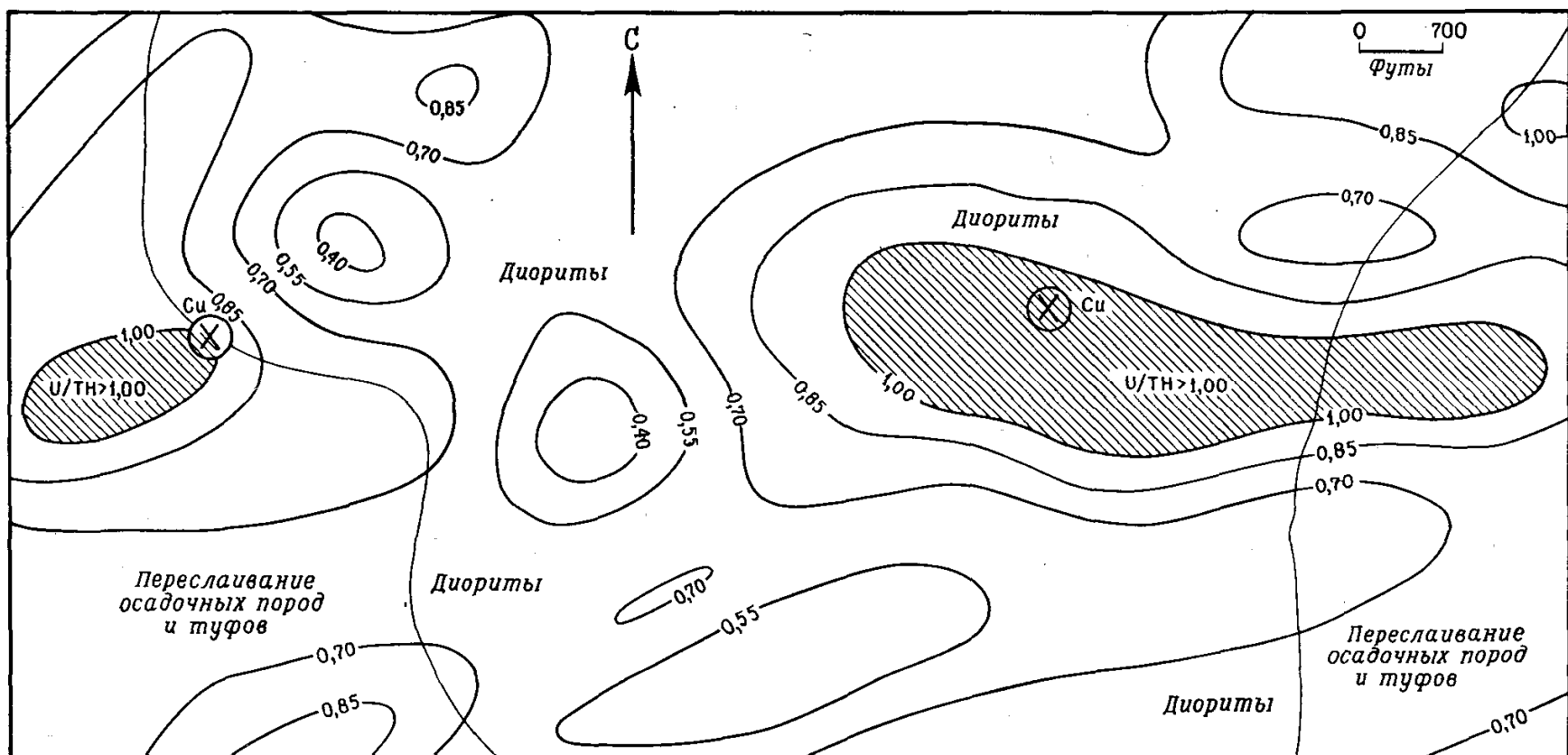
В осадочном цикле с калием, торием и ураном часто концентрируются некоторые другие элементы. В связи с этим радиоактивность представляет собой поисковый признак оруденения в осадочной обстановке. Ассоциация рассматриваемых радиоактивных и рудных элементов обусловлена сходством их физических и (или) химических свойств.

НЕКОТОРЫЕ ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ АЭРОГАММАСПЕКТРОМЕТРИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ

Урановая и молибденовая минерализация. На фиг. 1 приведена схема геологического строения района близ озера Эндрю в северо-восточной части Альберты, Канада. В пределах закартированной площади обнажаются магматические, осадочные и метаморфические породы докембрийского возраста. В западной части района выходят гранитогнейсы и метаосадочные породы высокой степени метаморфизма. В восточной половине района развиты порфи-



ФИГ. 1. Схема распределения радиометрических аномалий в районе близ озера Эндрю, северо-восточная часть Альберты.



ФИГ. 2. Соотношения аномалий уран-ториевого отношения, определенных аэрогаммаспектрометрическим способом, и месторождений меди в диоритах. Новый Южный Уэльс, Австралия.

робластовые, биотитовые граниты, массивные и листоватые равномернозернистые биотитовые и лейкократовые граниты и пегматиты, а также метаосадочные породы низкой степени метаморфизма с горизонтами лав и туфов. В районе проявились три системы разломов меридионального, северо-западного и западного направления. Все породы несут признаки деформации часто в виде ультрамилонитизации, кроме того, они заметно мигматизированы. Ориентировка листоватости колеблется от меридиональной до северо-восточной 30° с крутым падением преимущественно на запад.

В восточной части района выявлены более интенсивные аномалии концентраций урана и уран-ториевого отношения, чем в разрезе западной половины рассматриваемой площади.

Черными точками на фиг. 1 показаны участки повышенной радиоактивности, выявленные геологическими партиями при наземной съемке. Величина этих локальных аномалий в 2,5—5 раз превышает региональный фон. Большинство из них располагается внутри более широких урановых аномалий, околтуренных аэрогаммаспектрометрическим методом. При наземной съемке источник повышенной радиоактивности не идентифицировался, поскольку тогда еще не предполагалась возможность сопоставления с просто устанавливаемой аэрогаммасъемкой радиоактивностью, обусловленной ураном. В радиоактивности, определяющейся при наземных измерениях, наряду с ураном участвуют калий и торий.

В пределах аномалий повышенного содержания урана и уран-ториевого отношения, выявленных аэросъемкой в северо-западной части района, установлены тела пегматитов с молибденитом, пиритом и флюоритом. Молибденит обнаружен также на восточной границе аномалии уран-ториевого отношения, расположенной западнее озера Эндрю. В других районах, подвергнутых аэрогаммасъемке, аномалии уран-ториевого отношения были хорошими поисковыми признаками гидротермальной минерализации. Проявления такой минерализации нередко приурочены к краевым частям аномалий уран-ториевого отношения, как это, например, видно на фиг. 1.

Перспективные в отношении поисков площади, подчеркиваемые урановыми и уран-ториевыми аномалиями, составляют лишь небольшую часть закартированного района. Таким образом, аэрогаммасъемка позволяет избежать большого объема наземных исследований пустых площадей.

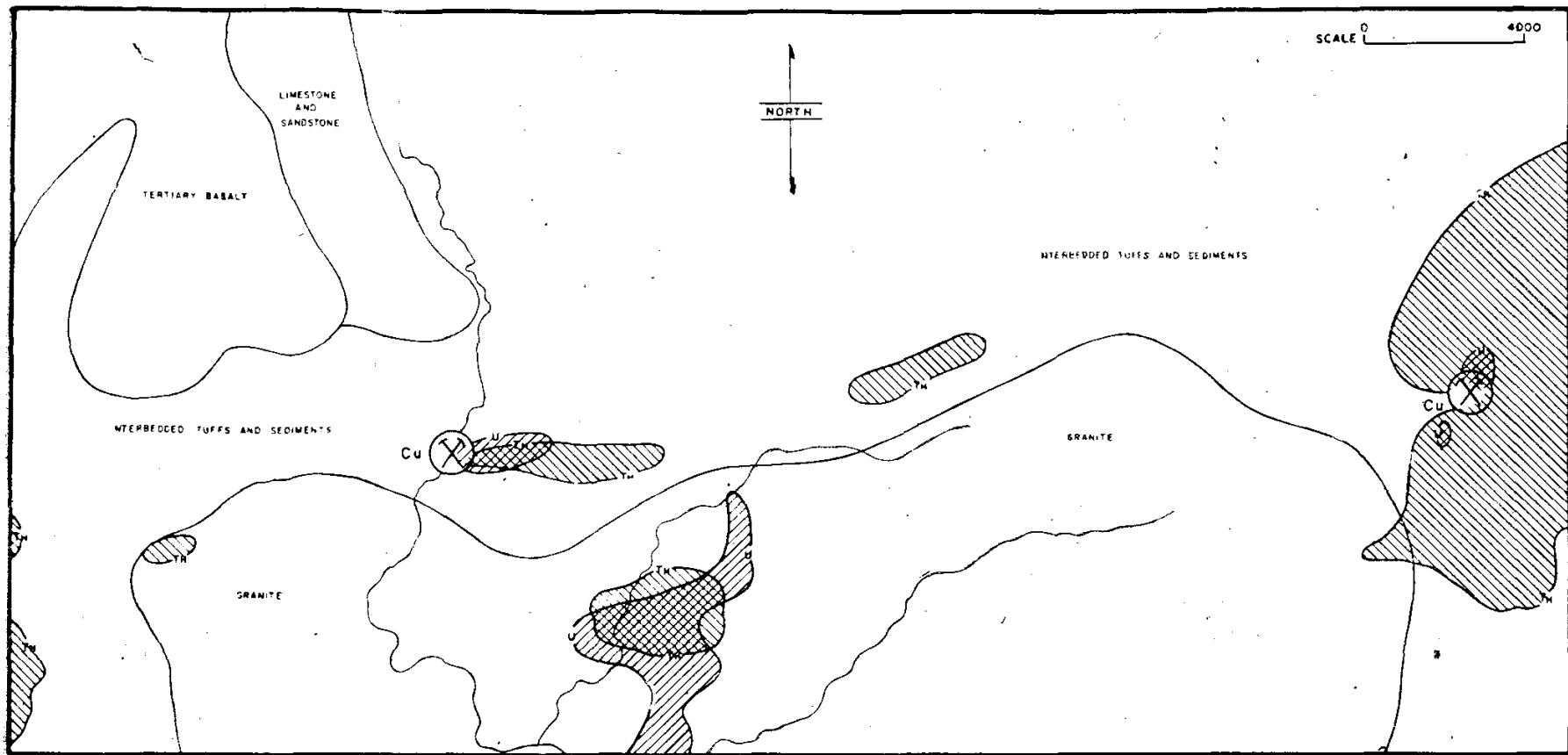
Контактно-метаморфические гидротермальные медные месторождения. На фиг. 2

приведены результаты аэрогеохимической съемки в Новом Южном Уэльсе, Австралия. Здесь в пределах аномалий уран-ториевого отношения располагаются два медных месторождения.

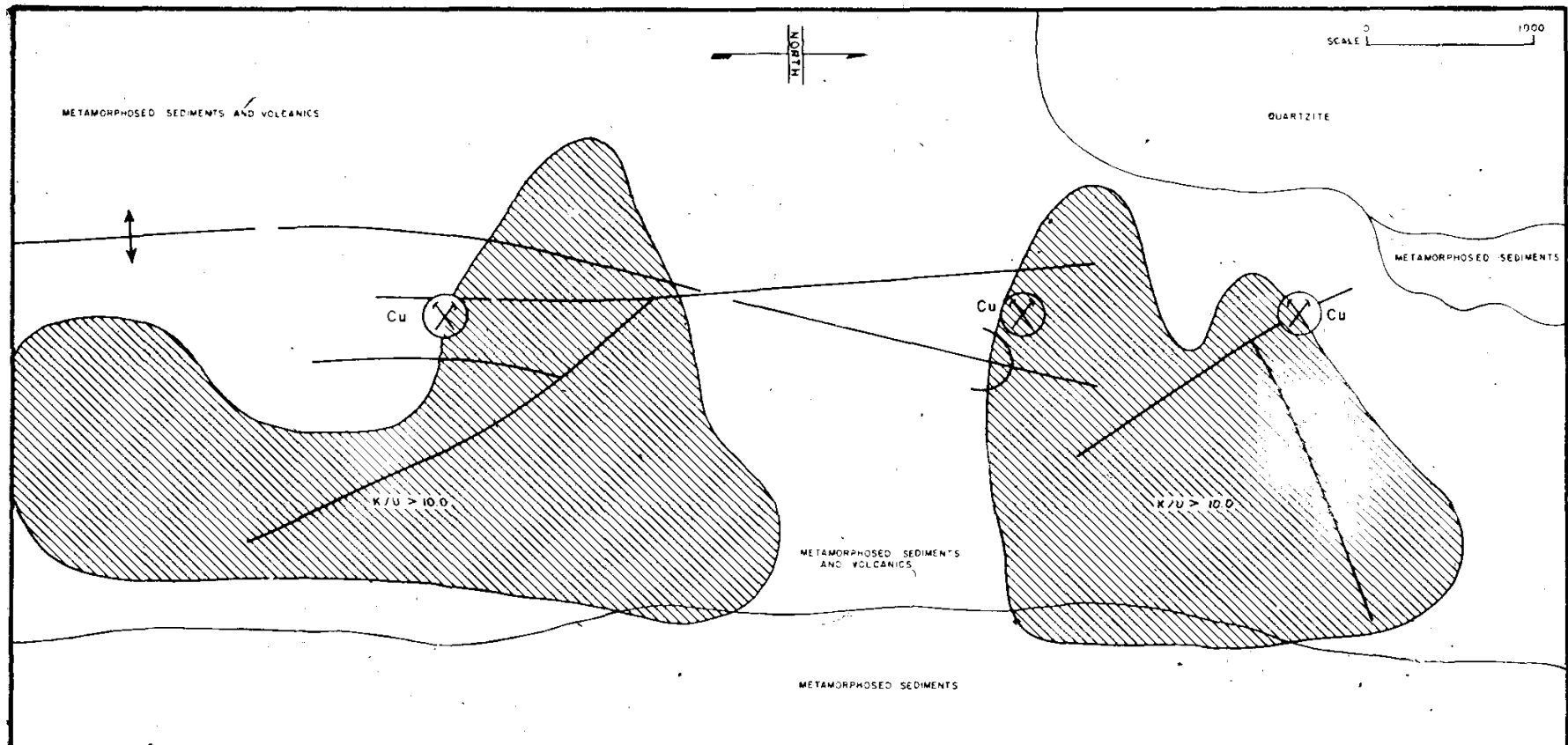
В рассматриваемом районе развиты ордовикские осадочные породы с прослоями туфов, интродуцированные штоком диоритов. В центральной части этого штока и локализуются медные месторождения, вмещающие породы которых представлены рассланцованными и брекчированными андезитами, их туфами и амфиболовыми кристаллическими сланцами, инъецированными диоритами и роговообманковыми сиенитами. Все породы метаморфизованы. Некоторые рудные тела приурочены к зонам скола в диоритах. В составе руд участвуют халькопирит, молибденит, эритрин, аннабергит, глаукоdot, торбернит и уранинит. Оруденение локализуется в пределах аномалии уран-ториевого отношения, которая связана с зоной изменения под воздействием поздних гидротермальных флюидов, отщеплявшихся от штока диоритов. Это контактно-метаморфическое месторождение протягивается в апикальную часть интрузивного тела, в которой, как известно, нередко концентрируются поздние флюиды малой плотности.

У западной границы штока расположено месторождение вкрапленных медных руд, представленных халькопиритом, рассеянным в диоритах и роговообманковых диоритах. Здесь оруденение приурочено исключительно к диоритам. Халькопирит ассоциирует также с пиритом в жилах, выполняющих трещины с азимутом простирания $S3\ 310^\circ$ и падающих в южных румбах.

Контактно-метаморфические медные месторождения, перекрытые осадочными породами. На фиг. 3 схематически показан другой район в Новом Южном Уэльсе, Австралия. Здесь также два медных месторождения приурочены к аномалиям распределения урана и уран-ториевого отношения, выявленным аэрогеохимической съемкой. Тонкозернистые ордовикские осадочные породы, туфы и андезиты интродуцированы в этом районе гранодиоритами. Вмещающие породы медного месторождения, расположенного в долине ручья севернее интрузива, представлены гранодиоритами, роговообманково-полевошпатовыми порфирами, а также известково-силикатными породами с кальцитом и гранатом. Сульфидная минерализация представлена халькопиритом и пиритом. Рудные тела имеют меридиональное простирание и склоняются к югу. Вначале это месторождение эксплуатировалось открытым спо-



ФИГ. 3. Соотношения аномалий содержаний урана и тория, определенных аэрогаммаспектрометрическим методом, и месторождений меди в осадочной толще. Новый Южный Уэльс, Австралия.



ФИГ. 4. Соотношения положительных аномалий калий-уранового отношения, определенных аэрогаммаспектрометрическим методом, и медных месторождений в метаморфических породах. Квинсленд, Австралия.

собом как железорудное. Позднее была пройдена шахта, вскрывшая медную минерализацию. Медные выцветы изредка наблюдались в обнажавшихся железных рудах, однако в одном проанализированном образце было установлено содержание меди 0,5%. В железистых кварцитах медь, очевидно, в основном представлена купритом. В скоплениях пирита, приуроченных к гранодиоритам, установлена также примесь золота.

Медное месторождение, расположенное северо-восточнее интрузива, локализовано вблизи контакта тонкозернистых осадочных пород и андезитов. В пределах месторождения развиты апофизы массива гранитоидов. Вмещающие оруденение породы представлены измененными андезитами, известковистыми и кремнеземистыми породами. В жильном кварце присутствуют халькопирит, пирротин и пирит с небольшой примесью арсенопирита. Выходы медных руд первоначально эксплуатировались открытым способом как железорудное месторождение. Мелкие кварцевые жилы со следами меди прослеживаются на глубину до скрытого рудного тела, начинающегося с горизонта 90 футов. Примесь меди установлена и в известняковом карьере, расположенном в 0,5 м или севернее на простирании прослойков, обогащенных пиритом. Известняки в карьере перекристаллизованы и переслаиваются с рассланцованными глинистыми осадками.

Ранее эксплуатировались два небольших тела высококачественных медных руд. В настоящее время подземным способом разрабатываются в двух местах рассеянные медные руды.

Ореолы гидротермального изменения, оконтуриваемые по величине уран-ториевого отношения и совпадающие с аномалиями содержания тория и урана (фиг. 2 и 3), явно связаны с трещинами растяжения. Направление трещиноватости, к которой приурочена циркуляция гидротермальных флюидов, можно увязать с левосторонним движением по сколовой зоне, ограничивающей с запада оба интрузива. Зона гидротермальной рассеянной минерализации вокруг медного месторождения, расположенного северо-восточнее интрузива (фиг. 3), имеет более значительные размеры, чем у месторождений, локализуемых по ручью. В обоих случаях хорошо проявилась сепарация урана и тория, особенно заметная в месторождении по ручью. Оба медных месторождения располагаются на границе урановой аномалии. Природа более крупной аномалии, располагающейся по соседству с медным месторождением, локализующимся в долине ручья, пока оста-

лась нерасшифрованной. Площадь совмещенных урановой и ториевой аномалий внутри интрузива пока не была изучена наземными работами и не отбракована как безрудная. К настоящему моменту можно считать, что наилучший поисковый критерий оруденения, локализуемого внутри интрузива, представляет собой уран-ториевое отношение (см. фиг. 2).

Гидротермальные метасоматические медные месторождения. На фиг. 4 показана схема расположения трех медных месторождений в северо-западной части Квинсленда, Австралия, которые были обнаружены по аномалиям калий-уранового отношения, закартированным при аэрогеохимической съемке.

В этом районе развиты нижнепротерозойские толщи, интродированные дайками основных пород. Вслед за внедрением даек здесь проявились разрывные нарушения и региональный метаморфизм. Позднее осуществилась еще одна фаза основного магматизма, вероятно сопровождавшаяся щелочно-хлоридным метасоматозом. После этого произошло внедрение магматических гранитов и формирование метасоматических гранитоидов, что сопровождалось обычными гидротермальными изменениями и минерализацией. Вмещающие породы собраны в крутые складки северо-западного направления, в большинстве случаев склоняющиеся на север. Эта толща рассечена меридиональными разломами, сопровождающимися зонами силицификации, которые служили каналами циркуляции гидротермальных растворов. По разломам обычно осуществлялись сдвиговые движения.

На трех медных месторождениях установлены сколовые зоны, к которым приурочены окисленные руды с жильным кварцем. Первичные руды представлены вкрапленностью халькопирита в кварце с примесью кальцита.

Метасоматические гидротермальные медные руды локализуются в сколовых зонах в пределах участков с аномальной величиной калий-уранового отношения. Такие участки, в которые в процессе метасоматоза явно привносился калий, четко оконтуриваются при аэрогеохимической съемке,

Калий и уран также представляют собой надежные индикаторы при расшифровке региональной структуры. В районах с интенсивной трещиноватостью особенно полезен в этом отношении уран. Трещины играют роль коллекторов для радона-222, в результате радиоактивного распада которого образуется $^{214}\text{В}$, поддающийся определению при аэрогаммасъемке.

В этом районе намечается структурный контроль локализации трех медных месторожде-

ний. Гидротермальные растворы образовали явные ореолы рассеяния вокруг разломов и сколовых зон, послуживших путями циркуляции растворов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате недавних исследований в двух рудных районах Австралии посредством аэрогеохимической съемки удалось расшифровать по ореолам гидротермального рассеяния благоприятные для оруденения структуры и открыть медные месторождения. Проявления калиевого метасоматоза и ореолы гидротермального рассеяния в метаморфической толще фиксировались повышенными величинами калий-уранового отношения. В осадочных толщах, интродуцированных крупным штоком гранитоидов, по распределению урана, тория и величины уран-ториевого отношения выявлены пути циркуляции гидротермальных флюидов.

УСПЕХИ В КАЛИБРОВКЕ АЭРОГАММАСПЕКТРОМЕТРОВ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ГЕОХИМИЧЕСКИХ ПОИСКОВ

Б. Кук, Дж. Дувал,
Дж. А. С. Адамс
Райсовский университет,
Хьюстон, Техас

ВВЕДЕНИЕ

После того как аэрогаммаспектрометрия впервые была опробована в середине 1960-х годов, эта методика широко используется при геохимических поисках. Однако ее потенциальные возможности в получении детальной информации еще только начинают раскрываться. Главные препятствия на этом пути заключаются, очевидно, не столько в недостатке оборудования повышенной чувствительности и точности, сколько в редкости фундаментальных исследований, посвященных точной интерпретации физических и химических свойств природных объектов. При работах в этом направлении в Райсовском университете учитывался комплексный междисциплинарный характер проблемы и применялся подход, в котором сочетались геологические интерпретации и математическое моделирование с совершенствованием и изучением физических и инженерных аспектов оборудования и всей системы. Главная цель

В подвергнутой аэрогаммасъемке площади Канады в связи с аномалиями уран-ториевого отношения обнаружены проявления молибденовой минерализации. Многие участки повышенной радиоактивности, выявленные наземной съемкой, оказались расположенными в пределах урановых аномалий, установленных аэро-съемкой.

Рассмотренные примеры иллюстрируют возможности применения аэрогеохимической съемки к поискам рудных месторождений. В результате такой съемки удастся разграничить минерализованные и безрудные площади, что позволяет сконцентрировать наземные поиски в наиболее благоприятных районах.

Следует, однако, отметить, что при оценке результатов аэрогеохимической съемки в каждом конкретном регионе необходимо порознь рассматривать данные по отдельным элементам и их отношениям и осмысленно подходить к значению этих параметров в качестве поисковых критериев исходя из всех имеющихся геологических и геохимических данных.

этой статьи — исчерпывающее рассмотрение вопросов количественной калибровки аэрогаммаспектрометрической системы и информация о полученных к настоящему моменту результатах наших исследований по этой проблеме.

ГАММА-СПЕКТРОМЕТРИЯ ПРИРОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

Гамма-излучением в природной обстановке обладают преимущественно три химических элемента — торий, уран и калий. Наиболее удобны для определения концентраций этих элементов соответственно следующие виды излучений: 2,62 МэВ для ряда распада тория; 1,76 МэВ — для ряда урана и 1,46 МэВ — для калия. При условии должной разрешающей способности разграничения различных типов излучений в их спектре, знание полупериодов распада и распространенности исходных изотопов в принципе позволяет количественно

определять содержание тория, урана и калия в закрытой системе. К сожалению, ту часть Земли, для которой можно производить гамма-спектрометрические измерения, а именно самый верхний ее слой толщиной порядка 10 дюймов, часто нельзя считать закрытой системой для одного или нескольких из рассматриваемой триады радиоактивных элементов. Уран довольно легко окисляется до шестивалентного состояния и особенно чувствителен к выщелачиванию, а следовательно, может быстро удаляться из системы. Дальнейшее усложнение состоит в том, что уран-234 легче мобилизуется, чем исходный уран-238. Быстрое химическое фракционирование и высокая подвижность, относительно большой период полураспада дочернего газообразного продукта, радона-222, часто приводят к нарушениям радиоактивного равновесия в ряду урана-238. Такие нарушения равновесия нередко наблюдаются в природе и могут оказывать ощутимый положительный или отрицательный эффект при интерпретации результатов измерения содержаний урана в конкретных природных объектах. При определениях содержания калия необходимо вводить поправку на комптоновский эффект излучений высокой энергии продуктов распада рядов тория и урана. Однако повсеместное присутствие относительно больших абсолютных содержаний калия в природе способствует хорошей определмости этого элемента. Трудности в определении калия могут возникать, когда в породах мало калия, а содержания тория и урана повышенные. Наиболее просто определяется торий. Возможности этого определения ограничены только чувствительностью метода в связи с малым абсолютным содержанием калия в некоторых типах пород.

ВОПРОСЫ ПРИМЕНЕНИЯ ГАММА-СПЕКТРОМЕТРИИ В АЭРОГЕОХИМИЧЕСКОЙ СЪЕМКЕ

При взгляде с воздуха земная поверхность большинства районов выглядит явно неоднородной по многим признакам, однако эти неоднородности очень трудно оценивать наземными методами, поскольку сложно выбрать правильную систему опробования. С точки зрения калибровки методики прежде всего существует задача выбора однородного стандартного источника излучений настолько крупного, чтобы можно было принять его условно бесконечным по размерам (это необходимо для удобства опробования приборов), а также обладающего широкими вариациями абсолютных содержаний тория, урана и калия. Таким требованиям

применительно к съемке с вертолета, разработанной в Райсовском университете, отвечали два отвала бокситов (из Суринама и Ямайки) алюминиевого завода около Пойнт-Комфорт, Техас. Однородность радиоактивности этих отвалов была установлена наземными измерениями портативным полевым спектрометром. Точный состав бокситов определялся на черпаковых пробах с использованием калиброванного лабораторного гамма-спектрометра Райсовского университета. В суринамских бокситах были установлены следующие содержания радиоактивных элементов $64,0 \text{ млн}^{-1} \text{ Th}$, $1,0 \text{ млн}^{-1} \text{ U}$ и $0,0\% \text{ K}$; в ямайских бокситах: $38,3 \text{ млн}^{-1} \text{ Th}$, $12,6 \text{ млн}^{-1} \text{ U}$ и $0,0\% \text{ K}$. Эти составы позволяют вычислить пять из шести констант, необходимых для калибровки гамма-спектрометрической вертолетной системы — C_T , S_1 , C_U , S_2 и S_3 , связанных следующими соотношениями:

$$\text{Th} = C_T R_4,$$

$$\text{U} = C_U (R_3 - S_1 R_4),$$

$$\text{K} = C_K \left[R_2 - \frac{U}{C_U} (S_2) - S_3 R_4 \right],$$

где Th, U, K — содержания радиоэлементов в стандартном источнике излучений, измеренные независимым методом;

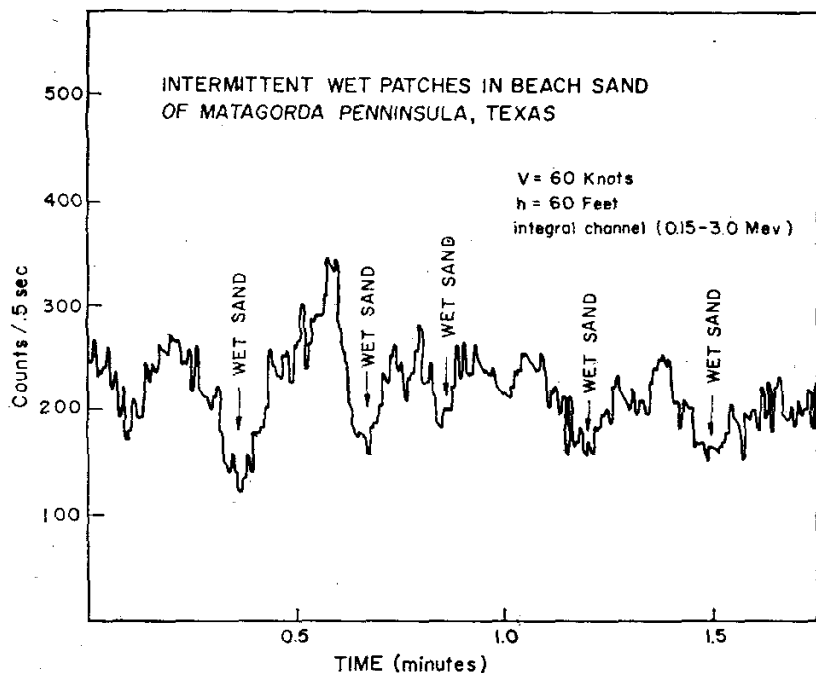
C — постоянные чувствительности,

S — постоянные размеров опробования,

R — скорости отчета, определяющиеся характером вертолетной системы.

Для вычисления константы чувствительности при определении калия C_K необходим стандартный источник излучения с большим абсолютным содержанием калия и повышенной величиной отношения калия к торию и урану. В настоящее время мы планируем оборудовать такой стандартный источник с использованием хлорида калия.

В связи с неоднородностью толщ горных пород возникают многочисленные трудности при интерпретации данных аэрогаммаспектрометрии. Идентификацию источников гамма-излучения могут порознь или в частности, в разных комбинациях, осложнять различия в плотности пород, обусловленные выветриванием, той или иной степенью уплотнения и водосодержания, интенсивностью растительного и снежного покрова, мощностью наносов. К этому добавляются еще вариации химического состава в разных горизонтах и даже в рамках одной геологической формации. В зависимости от рода конкретных задач гамма-спектрометрической съемки любая из перечисленных неоднородностей может стать главным объектом специального исследования. В некоторых случаях,



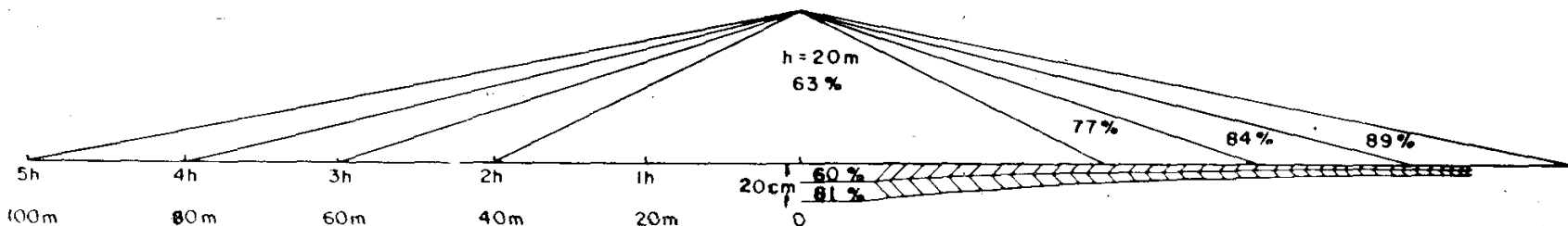
ФИГ. 1. Гамма-спектрометрический профиль над пляжем с чередующимися участками сухого и влажного песка на побережье Мексиканского залива, Техас. Записан с вертолета. Скорость v 60 узлов, высота h 60 футов. Данные интегрального канала (излучения с энергиями 0,15—3,0 МэВ).

однако, необходимо лишь отделить влияние сигналов из посторонних источников. В любом случае влияние различных факторов необходимо прежде всего идентифицировать, а затем отделить друг от друга и количественно оценить.

Некоторые из упомянутых эффектов наблюдались в проведенных нами исследованиях с вертолета. На фиг. 1 показана спектрограмма, иллюстрирующая влияние различного водосодержания в пляжных песках. В участках повышенного водосодержания проявились четко выраженные отрицательные пики по сравнению с уровнем, типичным для сухих песков. В другом районе наших исследований на пляже Мак-Федден, примерно в 40 милях северо-восточнее Галвестона, Техас, на спектрограммах в виде положительных пиков были зафиксированы тонкие прослой глины, присутствующие под слоем пляжного песка. Кроме того, установлены различия интенсивности излучения от

вспаханных и неспаханных полей, а также возможные различия гамма-активности разных типов растительного покрова. В настоящее время нам удается лишь идентифицировать наличие неоднородностей гамма-излучения в коренных породах. Для разработки приемов их точной оценки необходимы дальнейшие более детальные наземные исследования.

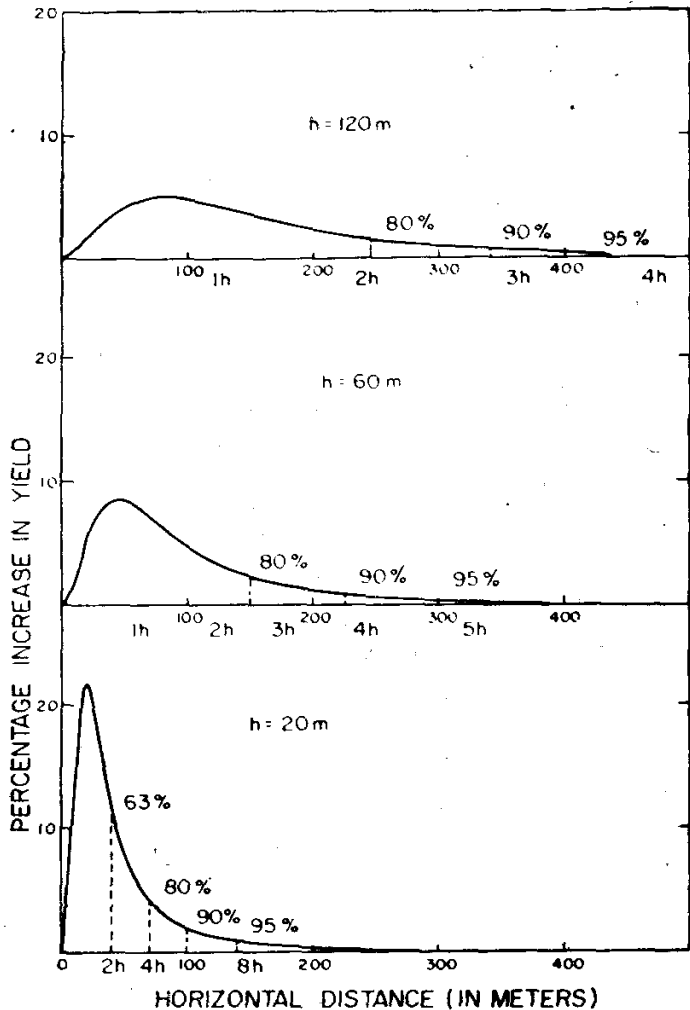
Помимо проблемы опробования, связанной со свойствами земной поверхности, существует также задача ликвидации методических затруднений, обусловленных конечным характером детекционной системы и ее удаленностью от источника излучений. Используемая нами в настоящее время система состоит из двух NaI (Tl)-детекторов объемом 5×5 дюймов, переменного одноканального анализатора, счетчика и цифрового самопишущего устройства. При стандартной съемке детекторы, установленные внутри багажного отделения вертолета, перемещаются на высоте 50 футов от земной поверхности со скоростью 60 узлов. Дискриминаторные окна установки отрегулированы на излучения с энергиями 1,46, 1,76 и 2,62 мэВ (соответственно испускаемые калием, ураном и торием). Дополнительное окно фиксирует суммарно все излучения с энергией от 0,5 до 3 МэВ. Заранее задается время 0,5 с для фиксации интегрального излучения. Расстояние с разрешающей способностью для этой дистанционной системы можно оценить эмпирически для каждого специфического источника излучения. Этот параметр можно выразить в виде эффективного объема некоторого бесконечного плоского источника бесконечной глубины, опробуемого системой с данной эффективностью в течение одного фиксированного интервала времени. Участок поверхности, соответствующий эффективному объему, обычно называют «исследуемым кругом». На фиг. 2 приведена теоретическая схема, иллюстрирующая понятие эффективного объема без учета эффективности детекторной системы. Соответствующую этому теоретическому эффективному объему площадь поверхности можно назвать сферой



ФИГ. 2. Схема шкалы влияния (в %) площади и объема бесконечного плоского источника излучений на аэродетекторе, расположенном на высоте 20 м от этого источника.

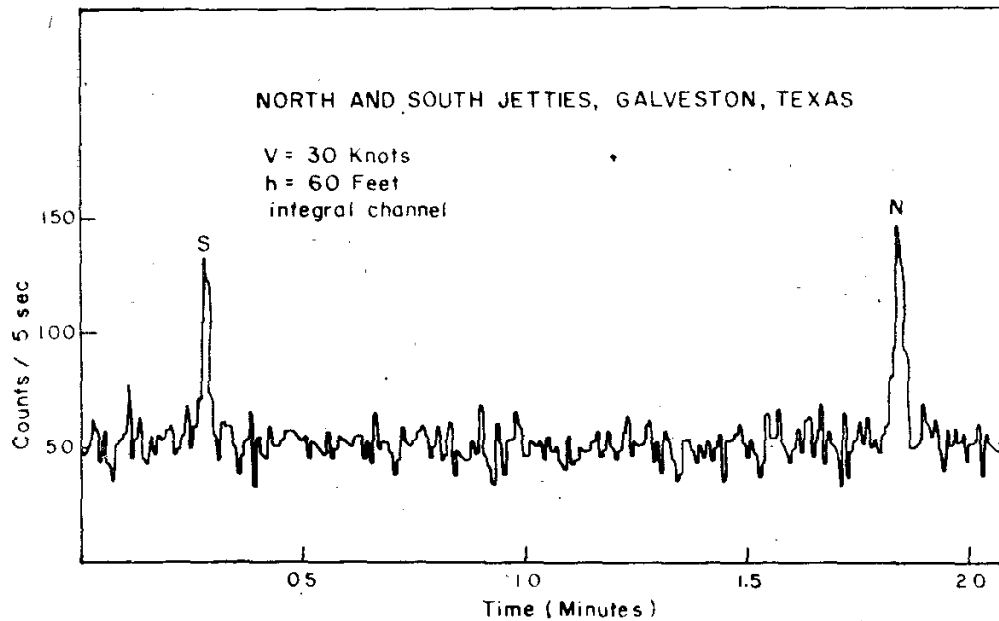
Вклад поверхности в фиксируемое детектором излучение оценен как функция расстояния по горизонтали от места расположения детектора. Рассчитано для гамма-лучей с энергией 2,62 МэВ и источника с плотностью 2 г/см^3 .

действия «источника». Как реальный, так и теоретический эффективные объемы в поперечном разрезе должны иметь блюдцевидную, а

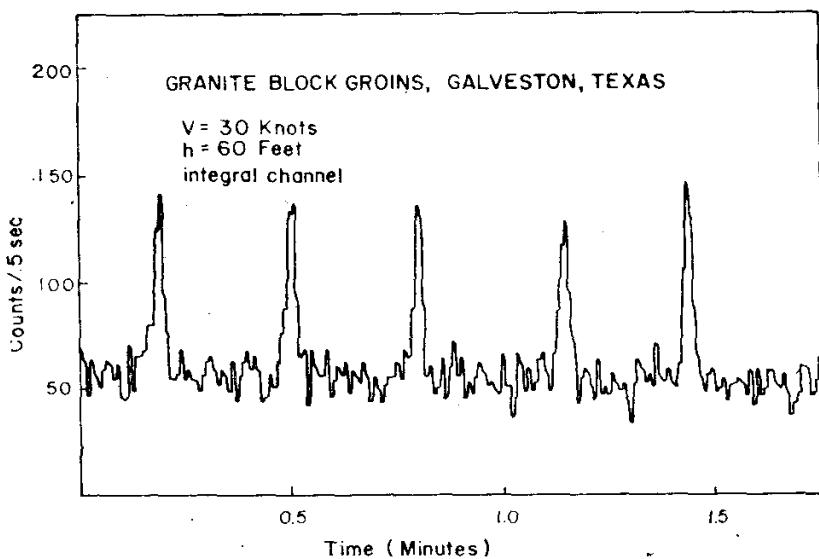


ФИГ. 3. Вклад в фиксируемую детектором радиацию (%) как функция от радиуса «сферы влияния источника» при разных высотах расположения детектора.

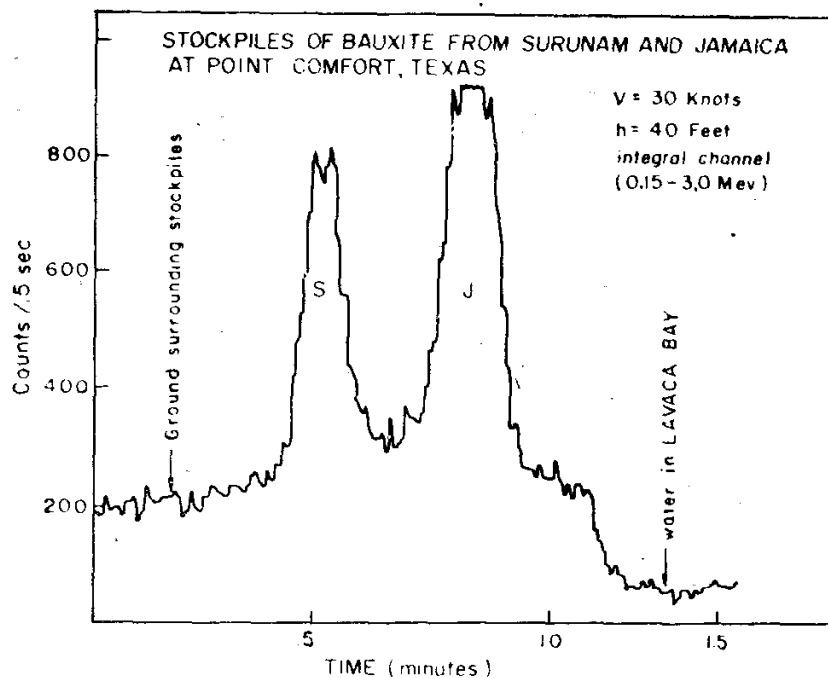
в горизонтальном сечении приблизительно округлую форму. График фиг. 2 построен по данным расчета для гамма-излучения с энергией 2,62 МэВ при расположении детектора на высоте 20 м и плотности источника 20 г/см³. При таких условиях 63% излучения, выделяющегося из бесконечно плоского источника и улавливаемого детектором, поступает из круга радиусом 40 м (удвоенная высота), 77% — из круга радиусом 60 м и 89% — из круга радиусом 100 м. Гамма-излучение с энергией 2,62 МэВ обнаруживается лишь с небольшой



ФИГ. 4. Вертолетный гамма-спектрометрический профиль через гранитные дамбы шириной 12 футов близ Галвестона, Техас. Скорость полета v 30 узлов, высота h 60 футов (интегральный канал).



ФИГ. 5. Вертолетный гамма-спектрометрический профиль через гранитные плотины шириной 35 футов близ Галвестона, Техас. Скорость v 30 узлов, высота h 60 футов (интегральный канал).



ФИГ. 6. Вертолетный гамма-спектрометрический профиль через бокситовые отвалы алюминиевого завода около Пойнт-Комфорт, Техас. Скорость v 30 узлов, высота h 60 футов (интегральный канал).

глубины от поверхности, так что 81% улавливаемой детектором его величины относится к слою толщиной 20 см. В данном случае площадь «исследуемого круга» не определялась, но должна быть несколько меньше «сферы влияния источника» той же активности.

Фиг. 3 несколько иначе иллюстрирует те же соотношения, что и фиг. 2, но в этом случае лучше видно увеличение разрешающей способности с уменьшением высоты детектора. По сравнению с высотой детектора 20 м круговой источник излучения радиусом примерно в одну треть площади, видимой с высоты 120 м, будет играть роль бесконечного двумерного источника. В таком случае при расположении детекторной системы ниже 20 м будет улавливаться 95% излучений, а при расположении выше этой точки — 60—70% излучений. Гораздо легче интерпретировать данные для бесконечного однородного источника, чем для конечной площади с несколькими локальными источниками излучений.

Однако даже при относительно низком расположении детектора и небольшой скорости относительно земли создается возможность выявления некоторых конечных особенностей распределения радиоактивного вещества. Такие локальные аномалии при записи обусловят появление резких пиков, высота и ширина которых находятся в сложной функциональной зависимости от режима полета, состава, плотности и размеров источника излучения. Примеры записи таких конечных источников излучения даны на фиг. 4—6. На этих графиках приведены суммарные интенсивности излучений с энергиями в пределах от 0,15 до 3,0 МэВ, фиксируемые с интервалом 0,5 с. На фиг. 4 зафиксированы пики, обусловленные гранитными дамбами шириной 12 футов, выступающими над поверхностью воды. На фиг. 5 приведена запись над гранитной плотиной, которая была шире дамб в 2—3 раза. Характер графика в этом случае близок к наблюдающемуся у фиг. 4, но пики в этом случае шире. Из фиг. 6 видно, что два отвала бокситов имеют достаточно высокую радиоактивность и располагаются настолько близко друг к другу, что в пространстве между ними создается повышенный фон.

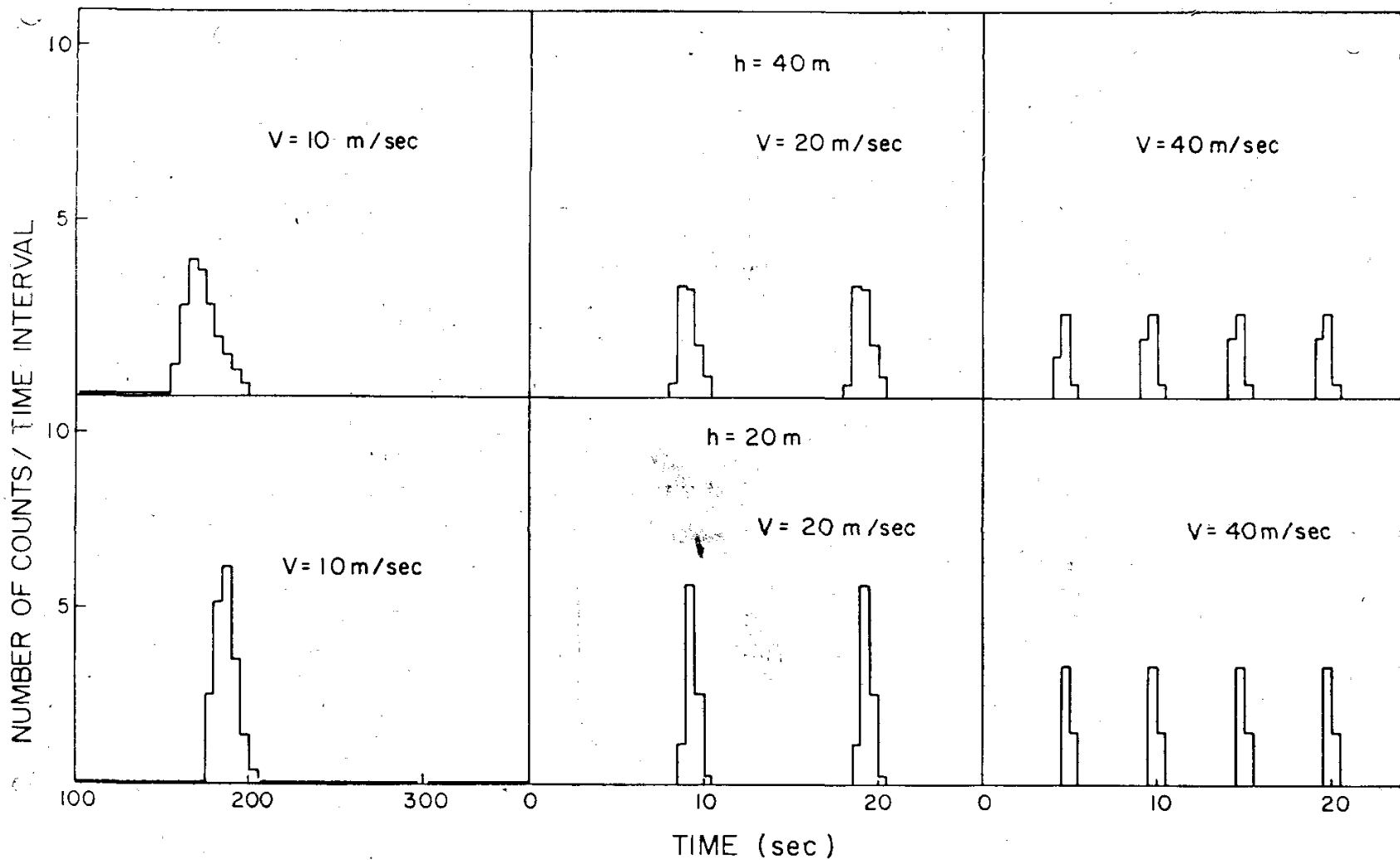
На поток гамма-лучей влияет столь большое количество факторов, что существенное значение имеют для их оценки специальные наземные определения. Однако моделирование с использованием электронно-вычислительной машины и с учетом различных комбинаций этих переменных позволяет прогнозировать размеры источников излучения и величину их

активности для определенного типа графиков аэропрофилирования. Такого рода интерпретации довольно затруднительны, когда профили записаны на большой высоте, но их достоверность значительно возрастает при меньшей высоте расположения детектора в связи с увеличением разрешающей способности. Наши исследования в этом направлении только начаты, но на фиг. 7 приведена иллюстрация рассматриваемого методического приема. На каждой из шести приведенных схем дается кривая изменения активности в связи с конкретным источником излучения, но при различных параметрах аэросъемки. Гранитные плотины Галвестона позволяют проверить правильность такого моделирования для системы бесконечных источников излучения конечной ширины, расположенных через правильные интервалы перпендикулярно линии полета. На шести графиках фиг. 7 видно, как изменяется характер записи на двух высотах при различной скорости полета. При учете эффекта статистических флуктуаций можно получить даже более четкие картины.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Несмотря на многие факторы, влияющие на интенсивность потока гамма-лучей в природных условиях, мы полагаем, что большинство этих факторов оказывает лишь слабое влияние на фиксируемую при съемке величину радиоактивности и что большинство сигналов непосредственно обусловлено горными породами.

В районе, охваченном нашими исследованиями, развиты разные типы горных пород, а следовательно, имеется ряд различающихся источников излучения, связанного с присутствием тех или иных количеств тория, урана и калия. Как по абсолютному, так и по относительному содержанию этих элементов удастся различать по крайней мере десять типов горных пород и почв. В табл. I приведены данные, необходимые для интерпретации результатов аэрогаммасъемки. Здесь сопоставлены количества импульсов и вариаций их в единицу времени в каждом из используемых при съемке каналов для различных природных источников гамма-излучения. Количество импульсов в 1 с, приведенные в табл. I, были определены в течение периодов времени в несколько минут над выходами настолько крупных размеров и при столь низких высотах расположения детектора, что изучаемые объекты можно было рассматривать как бесконечный плоский источник бесконечной мощности. Полученные ско-



ФИГ. 7. Рассчитанные на ЭВМ для разной высоты и скорости полета гамма-спектрометрические профили через серию полубесконечных линейных источников излучения шириной 7 м, расположенных через интервал 200 м.

Таблица I

Вариации числа импульсов в 1 с от различных источников излучения в трех каналах детекционной системы

Источник излучения	К			U			Th		
	R ± E ₈₂	T	D	R + E ₈₂	T	D	R ± E ₈₂	T	D
Вода (фон)	3,5±0,7			4±2			2,2±0,3		
Серпентин	5,1±4	141 мин	141 миля	6±4	150 мин	150 миль	6,8±4	18 мин	18 миль
Пляжный песок	12,4±3	12,3 мин	12,3 мили	6,3	176 мин	176 миль	4,8±2,5	111 мин	111 миль
Известняк	9,0±4	19 мин	19 миль	7±3,5	67 миц	67 миль	4,0±2	330 мин	330 миль
Гранит 1	158,0±30	0,3 с	29 футов	38±12	0,1 с	8,8 фута	40,0±10	12 с	1055 футов
Гранит 2 и 3	134,0±30	0,4 с	32 фута	19±12	29 с	252 фута	16,0±10	38 с	3380 футов
Гранит 4	140,0±30	0,4 с	32 фута	26±12	17 с	1530 футов	20,0±10	28 с	3228 футов
Гранит 5	154,0±20	0,7 с	63 фута	31±12	14 с	1190 футов	33,0±10	15 с	1302 фута
Боксит (Ямайка)				64,5±15	3 с	290 футов	53,0±15	4 с	361 фут
Боксит (Суринам)				61,8±15	4 с	308 футов	89,9±15	2 с	202 фута

R — скорость, имп./с.

T — интеграционный интервал времени наблюдения, мин или с.

D — общее расстояние профиля за время T при v = 60 миль/ч.

b — фон.

E₈₂ — кажущаяся ошибка подсчета при 82%-ном доверительном уровне, равная $\frac{134 (RT + R_b T)^{1/2}}{(RT - R_b T)}$.

Таблица II

Сопоставление содержаний тория (в млн⁻¹) по данным калибровки детектора NaI (Tl) и пластической сцинтилляционной системы

Источники излучения	NaI (Tl) 1	Пластический сцинтиллятор 2
Гранит	22,9	18,0
Известняк	1,5	1,2
Серпентин	3,5	2,0

1 Два кристалла NaI (Tl) размером 5×5 дюймов.

2 Два пластических сцинтиллятора 6×6×66 дюймов.

рости импульсов отражают ограниченную чувствительность сдвоенного детектора NaI размером 5 × 5 дюймов, обычно используемого в наших предварительных исследованиях. Эти цифры не откорректированы на комптоновский эффект и величину обратного рассеяния и, таким образом, за исключением тория, не отражают истинных содержаний радиоактивных элементов. Тем не менее обсуждаемые величины отражают относительные соотношения активностей отдельных типов пород и подчеркивают специфичность каждого из них по радиоактивным свойствам. Выявившаяся специфичность состава позволяет считать, что торий, уран и калий потенциально представляют ценность для интерпретаций по данным аэросъемки абсолютного возраста пород.

В последнее время мы начали изучать применимость к вертолетной съемке двух пластических сцинтилляторов размером 6 × 6 × 66 дюймов. Первые результаты этой работы весьма обнадеживают. Большие размеры этих сцинтилляторов позволили оценивать скорость импульсов на порядок выше, чем с используемыми ранее детекторами. Помимо того что вновь примененные сцинтилляторы имеют гораздо большую разрешающую способность, они

неожиданно оказались очень полезными также с точки зрения получения спектральных данных по торью.

В табл. II приведены содержания тория в трех типах пород по данным определения двумя использовавшимися нами детекторными системами. Эти величины были рассчитаны с использованием калибровочных констант, полученных в лаборатории, и скоростей импульсов двух детекторных систем, установленных по отвалам бокситов. Наземные определения содержания тория в трех сопоставляемых типах пород еще не завершены, однако уже можно сказать, что содержания в них тория и урана близки к характерным для этих пород вообще. Более детально сопоставление двух детекторных систем мы приведем в следующей статье.

ВЫВОДЫ

Наша работа в основном была направлена на методическое обоснование аэрогаммасъемки с выбором подходящих источников излучения на предмет калибровки и испытания (с параллельными радиометрическими наземными определениями). Исследования еще не завершены и продолжаются преимущественно для налаживания и разработки требований к опробуемой системе. Опробуемая в настоящее время новая шестиканальная система позволит определять в природной обстановке многие тонкие параметры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Adams J. A. S., Fryer G. R. E., Rogers J. J. W., Gamma-ray Spectrometry for Airborne Geochemistry, Analytical Chemistry, 41, № 6, 22A — 28A, 1969.
2. Adams J. A. S., Total and Spectrometric Gamma-ray Surveys from Helicopters and Vehicles, Proceedings of the Symposium on Use of Nuclear Techniques in the Prospecting and Development of Mineral Resources, sponsored by the International Atomic Energy Agency at Buenos Aires, Argentina, nov. 5-10, 1968.

АЭРОГАММАСПЕКТРОМЕТРИЧЕСКОЕ КАРТИРОВАНИЕ

А. Г. Дарнли,
Р. Л. Грести,

Геологическая служба
Канады, Оттава

ВВЕДЕНИЕ

Цель настоящей статьи — обоснование побудительных мотивов, методики и результатов экспериментального аэрогаммаспектрометри-

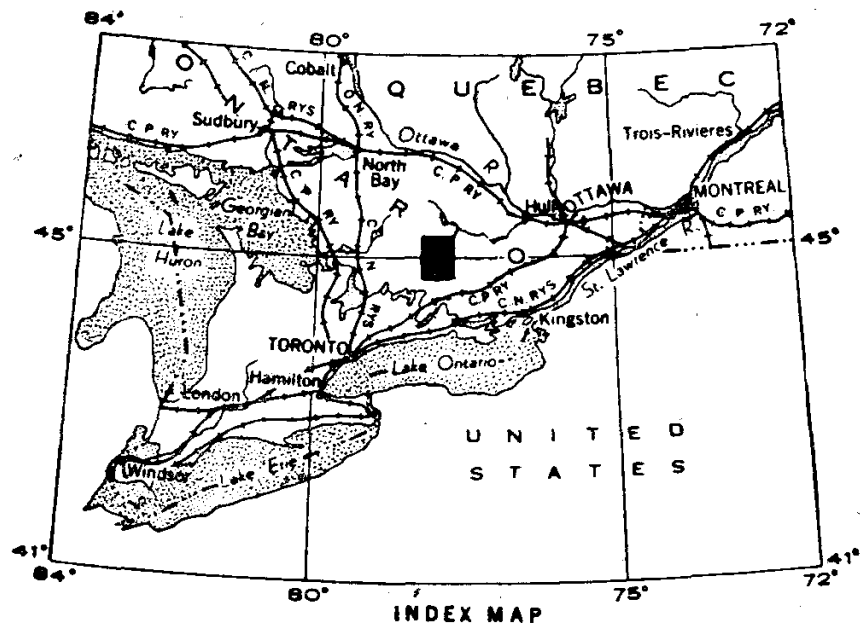
ческого картирования, предпринятого Геологической службой Канады в районе Банкрофта, Онтарио.

Гамма-лучевая спектрометрия — первый в новом семействе поисковых методов. Одним

из главных факторов, обусловивших широкое распространение и успех геофизических методов поисков в два прошедшие десятилетия, была возможность использования их с применением авиации. По мере практического внедрения аэрогеохимических методов к ним оказалось возможным приложить те же логические и экономические положения, которые были разработаны в процессе широкого использования аэрогеофизических методов поисков. Поскольку геофизические методы в общем позволяют лишь косвенно судить о полезных ископаемых, оказалось целесообразным дополнять их геохимическими данными о содержании элементов. Соответственно при возможности проведения аэрогеохимических поисков на площадях, покрытых аэрогеофизической съемкой, значительно сокращаются объемы и возрастает эффективность наземных работ. Аэрогеохимические методы при региональных исследованиях позволяют сравнительно классифицировать аномалии и выделить наиболее интересные для поисков зоны. Наземные исследования при такой последовательности работ становятся необходимыми лишь для детализации сведений о выделенных зонах, недоступных аэрометодам. В этом случае в процессе наземных геологических исследований можно провести инструментальные работы с отбором контрольных проб для полного лабораторного анализа. При правильном подходе аэро- и наземные исследования отнюдь не противопоставляются, а дополняют друг друга.

Одно из главных преимуществ аэрометодов заключается в том, что они допускают опробование любой избранной части исследуемого региона с любой желательной частотой профилей и высотой полета. При необходимости можно подвергнуть равномерному изучению также всю территорию района. В отличие от устоявшихся геохимических методов, используемых при региональных исследованиях в настоящее время, аэрометодами сразу охватываются обширные участки. Главное ограничение аэрогеохимии на 1970 г. — возможность определения с ее помощью лишь калия, урана и тория. Меньшее значение имеют относительно грубая пространственная привязка проб и меньшая аналитическая точность по сравнению с достигаемой при анализе мелких проб в идеальных лабораторных условиях.

Как будет показано ниже, измерение большого количества аэропроб аналитически эффективно, позволяет на стадии поисков относительно точно локализовать объекты, подлежащие детальному изучению, и в связи с быстро-



ФИГ. 1. Обзорная карта района Банкрофта, в котором проводилась аэрогаммаспектрометрическая съемка.

той исследований дает важный экономический эффект.

Исследования по программе гамма-лучевой спектрометрии, проводимые Геологической службой Канады с 1966 г., освещены в ряде публикаций [3, 4, 5]. В этих статьях рассмотрена эволюция работ, начиная с наземных экспериментов, сменившихся опытными, а затем систематическими съемками с применением вертолетов и завершившихся созданием высокочувствительной системы для самолетов. На фиг. 1 показано расположение района Банкрофта, в пределах которого выполнено большинство экспериментальных работ.

ОБОРУДОВАНИЕ

Для составления по данным аэрогеохимической съемки карт желательной точности необходима строгая взаимная регулировка различного оборудования, большая часть которого значительно отличается от обычно используемого при геофизических и геохимических поисках.

Самолет. Эксплуатация самолета составляет главную часть стоимости любых аэроисследований, однако эффективность аэросъемки определяется производительностью исследовательского оборудования в совокупности с летными качествами используемого самолета. Это положение особенно справедливо для гамма-лучевой спектрометрии. При аэросъемке действуют четыре взаимосвязанных фактора: расстояние между профилями, скорость полета, высота полета и чувствительность оборудова-

ния. Как уже было указано ранее [5], еще до начала работ следует точно установить необходимые пространственные параметры съемки. Лишь после этого можно избрать правильную комбинацию всех четырех вышеперечисленных факторов и определить необходимый тип самолета. Затем этот выбор можно окончательно обосновать с точки зрения техники безопасности и экономики. Особенно важно четко понимать, что три взаимосвязанных фактора — скорость и высота полета и чувствительность оборудования (общий объем детектора гамма-лучевой спектрометрии) определяют летные качества самолета. Самолет представляет собой часть общей съемочной системы и должен рассматриваться именно с этой точки зрения.

Мотивы, по которым Геологическая служба Канады избрала для выполнения программы аэрогаммаспектрометрической съемки самолет типа «Шорт-Скайвен», уже были освещены в печати [4].

Спектрометр. Ранее описывался [4] использовавшийся в настоящей работе высокочувствительный спектрометр, а также произведенные в нем после первого съемочного сезона (1968 г.) усовершенствования [5]. Главные особенности этого прибора состоят в следующем: 1. Система включает детектор большого объема (3000 куб. дюймов), который состоит из двенадцати кристаллов NaI (Tl) размером 9×4 дюйма. Такой большой объем детектора необходим, чтобы обеспечить достаточно высокую скорость счета импульсов и необходимое для удовлетворительных статистически вариаций число импульсов над районами со средней радиоактивностью. 2. Детектор работает при постоянной температуре $37,8^\circ \text{C}$, что сводит к минимуму спектральные смещения. 3. Разграничение излучений по величине их энергии производится на 128-канальном анализаторе. 4. Импульсы регистрируются четырьмя счетчиками в любом из четырех заранее избранных интервалов спектра. 5. Импульсы накапливаются в течение заранее задаваемого интервала времени. 6. Накопленные отсчеты со счетчиков регистрируются на магнитной ленте совместно с данными по высоте, местоположению и закодированными данными о режиме работы. 7. Аналоговое счетное устройство обеспечивает непосредственно в полете запись скорректированных данных на карты, сразу же по мере их получения.

Важное значение имеет регистрационная магнитная лента, поскольку она позволяет в сильной мере автоматизировать последующую обработку данных при нанесении их на профили и карты.

Контроль высоты полета. Интенсивность излучения с теми энергиями, в диапазоне которых действует аэрогаммаспектрометр, уменьшается наполовину в пределах расстояния около 300 футов для лучей K-40 (1,46 МэВ) и 400 футов для лучей Tl-208 (2,62 МэВ) [4]. Для определения абсолютной скорости счета (частоты импульсов) необходимо привести данные измерений в воздухе к определенной постоянной характеристике. Следовательно, необходимо производить непрерывные точные определения расстояния до земной поверхности с использованием радарного альтиметра с конусом возврата лучей, насколько возможно соответствующим конусу, под которым поступает измеряемое излучение. Радарный альтиметр дает сигналы с напряжением, пропорциональным расстоянию до земной поверхности. Эта информация трансформируется в цифровую и усредняется для избранного интервала опробования вольтаж-частотным преобразователем такого же типа, как в спектрометре. Преобразованные данные одновременно поступают на магнитную ленту для использования в дальнейшем при интерпретации наземных данных, а также в аналоговое устройство для нанесения на синхронный самозаписываемый график.

Ориентационное оборудование. Точное ориентационное оборудование представляет собой важную составную часть современной аэросъемочной системы. Полученные данные измерений нельзя сколько-нибудь достоверно внести на профили и особенно на карты, если не иметь координат для каждой данной точки, которые должны регистрироваться синхронно с измерениями излучений.

Аэросъемку в отдаленных районах на небольшой высоте целесообразно вести с автономной навигационной системой как с точки зрения организации работы, так и по экономическим соображениям. Самолет «Скайвен», используемый Геологической службой Канады, оборудован навигационной системой Доплера; расстояния вдоль полетных маршрутов, а также в поперечном направлении от известных точек наносятся в процессе съемки на магнитную ленту. Необходимо иметь в виду некоторые сложности, возникающие при использовании системы Доплера в процессе съемки на малой высоте в связи с воздушными течениями и мелкими неровностями рельефа, которые искажают показания радара. Подобные побочные эффекты отсутствуют при съемках с нормальной высоты. В течение 1969 г. точность измерений вдоль полетных маршрутов при дистанциях, составлявших несколько километров, не превышала $\pm 2\%$.

Проложение маршрута в обычных аэро-съемочных системах производится лишь по фотошленкам. На самолетах «Скайвен» Геологической службы для визуальной проверки пути использовалась телевизионная видеопленочная система. Телевизионная камера, располагаемая в носу самолета, оборудована 110-градусными широкоугольными объективами, поле зрения которых распространяется от точки несколько выше горизонта до отвесного направления, а изображение передается на 5-дюймовый контрольный экран, расположенный перед оператором, и появляется на нем в избранном интервале (обычно в 1 милю), измеряемом радаром Доплера. Телевизионная картина фиксируется на видеопленке совместно с комментариями, передающимися по внутренней системе связи самолета. Это позволяет своевременно фиксировать номер профиля и называемые ориентиры, особенности рельефа или другие необходимые земные детали. Использование пленки создает возможность визуально прокладывать маршрут еще в процессе полета. Пленки пригодны для многократного использования.

КАЛИБРОВКА СПЕКТРОМЕТРА

Для получения воспроизводимых количественных измерений на гамма-спектрометре окщечного типа необходимо использовать всегда поток гамма-лучей строго определенных частей спектра. При составлении карт с количественно достоверными изолиниями важную роль играет надежная калибровка спектрометра. Эта надежность достигается двумя путями. В используемой системе предусмотрены: а) сведение к минимуму основных причин неустойчивости спектра, которая в основном бывает обусловлена колебаниями температуры в детекторах; б) возможность без труда контролировать и корректировать калибровку в случае проявления смещений спектра. Как уже отмечалось, смещения спектра сводятся к минимуму посредством поддержания в детекторах постоянной температуры.

Пределы энергии излучений, принимаемых каждым спектральным окошком, контролируются при помощи программных перфокарт. Спектрометр может работать по какой-либо одной из двух программ и выбор той или иной из них осуществляется посредством простого переключателя. Обычно одна программа используется при рядовой съемке, а другая предназначена для калибровки. Для исходной калибровки системы используется какой-либо изотоп, например Y-88 (1,83 МэВ).

Калибровку можно контролировать посредством накопления спектров, принимаемых мно-

гоканальным высокоимпульсным анализатором. В соответствии с выбранной программой четыре спектральных окошка можно использовать для захвата в вилку или сопоставления какой-либо части спектра. Диапазоны спектра, соответствующие отдельным окошкам при конкретной программе, фиксируются ограничителями в верхней части накопителя спектров. Для калибровки используются три сомкнутых окошка на 45 кэВ. При этом, для того чтобы перекрыть калибрационными окошками нужные каналы, в зависимости от энергии используемого для калибрации источника необходимо прибегнуть к той или иной соответствующей программе. Высоковольтный питатель можно отрегулировать таким образом, что калибрационный пик, выражающийся числом импульсов в секунду, будет приходиться на среднее окно. После осуществления такой регулировки 128 каналов спектрометра оказываются линейно распределенными в пределах диапазона энергий от 0 до 2,88 МэВ.

Вслед за этим проверяются спектры детекторов: вначале каждого кристалла отдельно, а затем все совместно. Если в силу каких-либо причин визуально обнаруживается смещение калибрационного спектра относительно необходимого распределения каналы — энергия излучения, то к соответствующему детектору подсоединяется высоковольтный питатель и наблюдаются изменения в показаниях прибора. Возможна и более тонкая регулировка посредством сравнения отсчетов в соответствующих счетчиках.

При обычной обстановке в поле содержание K-40 бывает достаточно высоким, чтобы по пику его излучения производить калибровку. Установлено, что контроль и, если это необходимо, регулировку работы спектрометра при завершении каждого профиля и в период перехода самолета на другой профиль целесообразно производить именно по пику K-40. В табл. I приведены диапазоны спектральных окошек, используемых в процессе съемки.

Таблица I

Диапазоны спектральных окошек

Определяемый элемент	Используемый изотоп	Энергия гамма-излучения, МэВ	Диапазон окошка, МэВ
K	K-40	1,46	1,37—1,57
U	Bi-214	1,76	1,66—1,86
Th	Tl-208	2,62	2,40—2,80
$\Sigma (K + U + Th)$			0,40—2,80

Второй аспект калибровки — периодическая проверка сохранения заданной чувствительности системы, т. е. числа импульсов на единицу концентрации. Для этого число импульсов в единицу времени в детекторной системе измеряется по отношению к стандартному их источнику. В этих целях Гелогическая служба Канады приблизительно раз в месяц использовала калибрационные эталоны Айлендского аэропорта Оттавы [5]. Однако такие проверки можно было бы производить и через любые другие фиксированные интервалы времени. Постоянно иметь какой-либо сильно радиоактивный эталон на самолете в период съемки явно нежелательно.

МЕТОДИКА КАРТИРОВАНИЯ

При аэрокартировании самолет летает на высоте 400 футов и со скоростью 120 миль в час. В зависимости от скорости и направления ветра скорость движения самолета по отношению к Земле обычно колеблется от 105 до 135 миль в час. При экспериментальном картировании в районе Банкрофта расстояние между профилями принималось равным 0,25 мили. При такой частоте профилей детекторы фиксируют излучение от всей картируемой площади, хотя роль различных участков неравноценна (вклад в фиксируемую радиоактивность экспоненциально возрастает по мере приближения к линии полета).

В настоящем сообщении при рассмотрении методики сбора данных опущено обсуждение аналоговой корректировочной и регистрирующей системы, которая представляет собой отдельную часть оборудования самолета.

Можно было бы избрать ту или иную систему временной цикличности, однако удалось установить, что наименьшие противоречия между требованиями к пространственной разрешающей способности и к должной статистической характеристике импульсов возникают при накоплении импульсов в каналах К-40, Bi-214 и Tl-208 в течение 2,5 с. В связи со значительно большим числом импульсов в единицу времени суммарное излучение накапливается для регистрации всего лишь за 0,5 с. Таким образом, за каждые 2,5 с регистрируется пять раз суммарная величина излучения и по одному разу — в каждом из трех окошек (К-40, Bi-214 и Tl-208), а также записываются величина средней высоты, дата, время начала полета, номер профиля, продольные и поперечные координаты, номер топографического сопоставления, операционный код, указывающий общий характер собираемой информации (съемка, из-

мерения фона или калибровка). Вся эта информация регистрируется на ленте самописца при помощи 15 четырехзначных цифр.

Корректировка. Для перевода отсчетов (числа импульсов в единицу времени) непосредственно в содержания элементов необходимо к исходным данным применить ряд корректировок.

Одна из наиболее важных корректировок — вычитание фонового излучения. Этот фон складывается из космического излучения, а также из радиации конструкций и оборудования самолета, но главную трудность при оценке фона представляют собой переменные количества радона в атмосфере и присутствие в воздухе непосредственно на пути самолета частичек продуктов распада (Pb-214, Bi-214) излучаемых элементов. В период съемки в районе Банкрофта летом 1969 г. доля Bi-214, непосредственно присутствующего в атмосфере, в общей определяемой величине содержания этого изотопа составляла 60—80%. В среднем 70% импульсов в окошке висмута спектрометра было обусловлено атмосферными частицами. Следовательно, для точной количественной и воспроизводимой оценки содержания определяемых радиоактивных изотопов на земной поверхности правильное определение доли атмосферных излучений имеет важнейшее значение.

Перед началом каждого полета производится определение радиоактивного фона над поверхностью любого подходящего озера. Фон в окошке Tl-208, обусловленный космической радиацией, обычно довольно постоянный. Количество импульсов в окошке Bi-214 колеблется как изо дня в день, так и в течение суток в зависимости от климатических условий. Сильные бури с дождями могут, правда на короткие сроки, резко увеличивать содержание Bi-214 [2]. Импульсы в окошке калия частично обусловлены постоянной долей излучения деталей самолета, а частично комптоновским рассеянием излучений более высокой энергии, величина которого изменчива. В этом последнем случае изменчивость фона имеет промежуточный характер между изменчивостями, которые свойственны излучениям диапазонов, фиксируемых окошками Bi-214 и Tl-208. Необходимо отметить, что фон в окошке калия по величине меньше, чем в двух других окошках.

Ранним утром в тихую погоду часто удается установить измеримые различия атмосферной радиоактивности в точках, отстоящих друг от друга на расстоянии в несколько миль. В связи с этим целесообразно рекомендовать определение фона как можно чаще. Определения фона можно производить по любому циклу измере-

ний, в котором величина импульсов калия окажется ниже некоторой номинальной величины, предположительно соответствующей фону. Номинальная величина импульсов калия определяется в условиях, когда существует уверенность, что определяемые импульсы обусловлены лишь поверхностью, покрытой водой. После получения четырех или более значений потенциального фона эти величины используются для вычисления пересмотренного значения фона Bi-214 для того же профиля. Величины фона в диапазонах калия и Tl-208 принимаются для каждого профиля по одному определению, сделанному вначале, поскольку они не обнаруживают обычно никаких значительных вариаций.

Рассмотренная выше корректировка явно зависит от наличия в картируемой территории часто расположенных озер диаметром не менее 0,25 мили. Это условие вполне реально для всего Канадского щита. Принятая процедура корректировки на фон хорошо разработана и позволяет избежать другого ее варианта, описанного Футом [7] и основанного на использовании дополнительных экранированных детекторов, специально контролирующей атмосферную радиацию. Однако при полетах вне щита, несомненно, возникает необходимость дополнительной проверки воздушной радиоактивности, которая может создавать кратковременные или локальные концентрации.

После корректировки на фон отсчеты импульсов следует привести к номинальной высоте полета 400 футов с использованием коэффициентов экспоненциального ослабления радиации, выведенных по способу, описанному Дарли и др. [4]. При средней высоте в течение оцениваемого периода счета (большем и меньшем номинальной величины) поправочные коэффициенты используются соответственно в сторону увеличения или уменьшения непосредственно измеренных величин. Коэффициенты ослабления радиации учитывают как реальное уменьшение интенсивности излучения с расстоянием от земной поверхности, так и комптоновское рассеяние.

Последняя корректировка элиминирует комптоновское рассеяние деградированного излучения высоких энергий, поступившего в каналы, фиксирующие лучи с меньшей энергией. Эта корректировка представляет собой довольно простую математическую операцию, описанную в цитированных выше работах авторов. Коэффициенты для этой корректировки определяются также на бетонных калибровочных плитах, специально для этой цели изготовленных Геологической службой Канады.

Таблица II

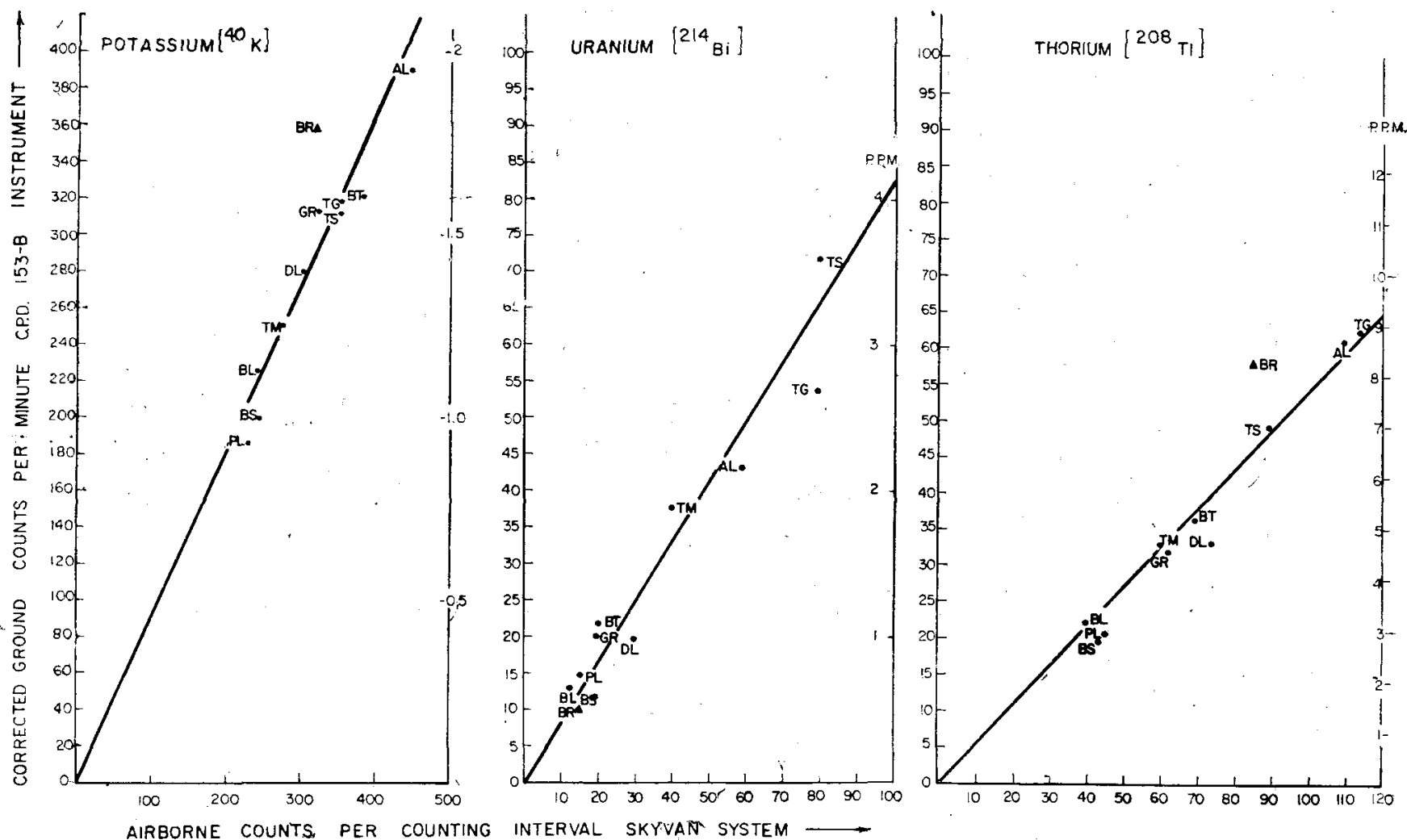
Коэффициенты на комптоновское рассеяние и ослабления радиации с высотой

Коэффициенты на комптоновское рассеяние	
α — количество импульсов урана на импульс тория — 0,368	
β — количество импульсов калия на импульс тория — 0,308	
γ — количество импульсов калия на импульс урана — 0,4686	
Коэффициенты ослабления радиации на 100 футов высоты	
Калий — 23,7%	
Уран — 15,1%	
Торий — 15,1%	
Общая радиоактивность — 20,0%	

В табл. II приведены величины ослабления радиации с высотой и коэффициенты на комптоновское рассеяние, использованные в настоящей статье.

Корреляция содержаний элементов. При рассмотрении методики геохимического картирования прежде всего необходимо уяснить способы корреляции частоты импульсов излучений, измеренных в воздухе с содержанием элементов на земной поверхности. Эту задачу можно решать в значительной мере теоретически, используя определения на калибровочных плитах, подобных упомянутому в предыдущем разделе, или с большей определенностью, посредством эмпирических наблюдений. Последние можно произвести двумя способами. Один из способов заключается в использовании серии участков, в которых точно определяется соотношение между содержаниями элементов на Земле и частотой импульсов в воздухе. Эти калибровочные опорные данные экстраполируются затем на всю картируемую площадь. По второму методу в качестве эталона используется взлетная площадка базы, с которой самолеты отправляются в аэросъемочные полеты.

В этом случае взлетная площадка при достаточных размерах также должна характеризоваться однородным распределением радиоэлементов в районе Банкрофта. Участки опорной корреляции земля — воздух были упомянуты в предыдущих публикациях авторов, в которых также приведены результаты сопоставления содержаний элементов на земной поверхности и частоты импульсов, определенных на высоте 250 футов на вертолете.



ФИГ. 2. Соотношения откорректированных частот импульсов, полученных при наземных измерениях и в воздухе системой «Скайвен» над десятью различными точками наблюдений (указаны первыми буквами) в районе Банкрофта, а также на испытательном полигоне Брекенридж (BR).

В качестве калибровочной взлетной площадки была избрана терраса реки Оттава близ хребта Брекенридж, Квебек, протягивающаяся на 2,5 мили при ширине 1/3 мили. Над этой площадкой были получены аэрогеохимические профили по такой же методике, как и при картировании района Банкрофта. Затем через правильные интервалы по тем же профилям производились наземные определения радиоактивности полевым спектрометром с целью определения средних содержаний радиоэлементов [2]. На фиг. 2 отражены результаты корреляции откорректированных частот импульсов на земной поверхности и в воздухе (система «Скайвен», высота 400 футов) для десяти точек в районе Банкрофта и для взлетной площадки близ Брекенридж. По опорным точкам района Банкрофта были получены следующие округленные соотношения содержаний радиоэлементов с числом импульсов в интервал времени 2,5 с: 1% калия — 200, $1 \text{ млн}^{-1} \text{ eU}$ — 25, $1 \text{ млн}^{-1} \text{ eTh}$ — 13. Примерно те же соотношения получены и при корреляции на Брекенриджской площадке. Они, однако, не принимались

во внимание в связи с тем, что в этом случае наблюдения производились на детекторах с шестью кристаллами (половина кристаллов использовалась в этот период на картировочных работах) для интервалов счета импульсов 5 с. Результаты этой корреляции вызывают также некоторое сомнение в связи с повышенным водосодержанием глинистой почвы Брекенриджской площадки, так как ночью перед этой операцией прошел сильный дождь.

Необходимо отметить, что оценка содержания урана и тория по данным гамма-спектрометрии с использованием NaI-детекторов основана на допущении равновесного состояния этих элементов с продуктами их распада, поскольку уран определяется именно по оценке содержания дочернего изотопа Bi-214, а торий — по содержанию Tl-208. Содержание продуктов распада эквивалентно содержанию исходного элемента лишь в том случае, если весь ряд радиоактивного распада находится в равновесии. Для того чтобы подчеркнуть только что отмеченную зависимость при оценках содержания урана и тория по принятой

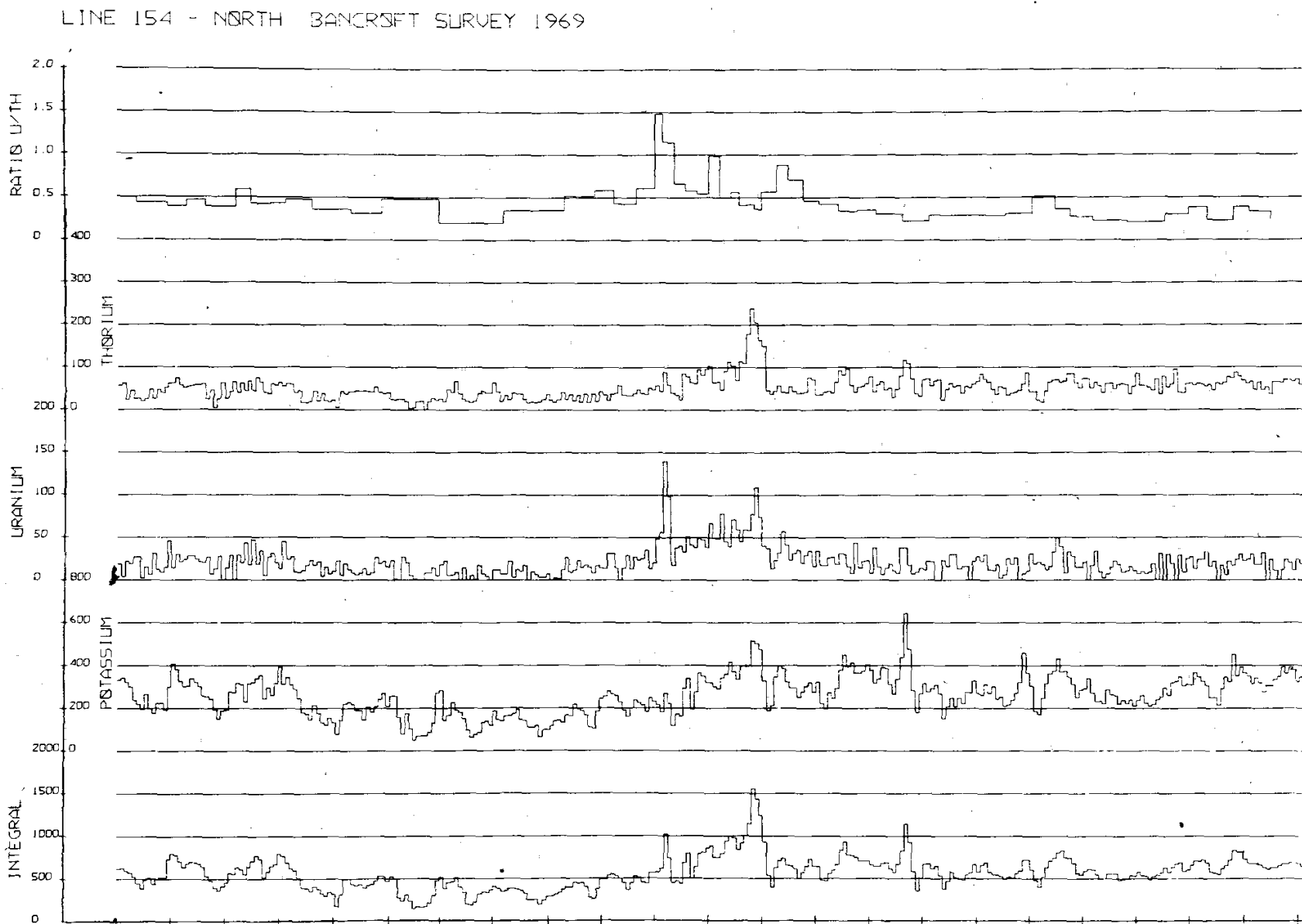
методике, их следует обозначать eU (эквивалентный уран) и eTh (эквивалентный торий), можно также их брать в кавычки («уран», «торий»). Необходимо всегда иметь в виду возможность ошибок в оценке содержаний радиоэлементов, обусловленных нарушением радиоактивного равновесия, однако следует учитывать и то обстоятельство, что аэрогаммаспектрометрические измерения производятся неизменно над крупными площадями и массами горных пород. В типичном случае единичный замер радиоактивности аэросъемочной системой «Скайвен» относится к площади порядка 1 млн. кв. футов. Если допустить, что при этом опробовании охватывается глубина от земной поверхности 0,5 фута, то при плотности 2,65 опробуется масса около 35 000 т. В столь крупной пробе локальные нарушения равновесия должны усредняться.

Пространственная привязка. При обсуждаемом в настоящей статье картировании про-

странственная привязка производилась с допущением однородной скорости самолета по отношению к главным ориентирам в каждом профиле, так что пространственные профили наносились единообразно. Все профили наносились на оригинальную рабочую карту с прямоугольной сеткой координат непосредственно в процессе съемки с использованием видеотайпа. Координаты поперечных увязочных линий определялись посредством интерполяции между промежуточными опорными ориентирами.

РЕЗУЛЬТАТЫ СЪЕМКИ

Профили. В качестве промежуточной стадии при составлении карты изолиний получали профили с нанесением данных замеров радиоактивности, пересчитанных на вычислительной машине. На фиг. 3 приведен пример такого профиля. Этот профиль длиной около 30 миль протягивается в меридиональном направлении



ФИГ. 3. Типичный откорректированный аэрогаммаспектрометрический профиль района Банкрофта.

Профиль протяженностью 28 миль и ориентированный меридионально проходит над урановым проявлением Грейхоук, фиксируемым резкими положительными аномалиями U и U/Th. Наивысшая интенсивность общей радиоактивности проявилась над участком, расположенным севернее поля гранитных пегматитов. График отношения U/Th построен по величинам откорректированных частот излучения, соответствующего этим элементам.

через проявление уранинита Грейхоук. Профилем пересечены все главные типы развитых в закартированном районе пород. Оригинал этого графика построен в масштабе 1:50 000. Любой участок профиля может быть построен и изображен значительно детальнее, за исключением данных по суммарной радиоактивности, которые усредняются. Любую точку профиля можно точно идентифицировать. Таким образом, профиль вполне комплементарен карте изолиний.

При построении профилей отношений двух измеряемых параметров применялась специальная методика с целью устранения значительных отклонений, возникающих в результате неопределенности отдельных частных измерений, особенно при очень незначительной частоте импульсов (например, над водой). Для того чтобы избежать таких незначимых и нежелательных результатов, программа специализировалась таким образом, что в случаях, когда содержание калия было ниже принятого минимума, отношения с его участием не вычислялись. Аналогичным образом при незначительной частоте импульсов Bi-214 и Tl-208 для обеспечения нужных для статистической достоверности величин интервалы счета автоматически объединялись, пока не получалось не менее 100 импульсов по каждому изотопу. В этой точке вычислялось отношение, распространяемое затем при построении графика на весь интервал, в котором происходило накопление импульсов.

Усреднение результатов и построение изолиний. Перед отображением в виде изолиний данных радиометрических измерений последние необходимо усреднять. Радиоактивность отличается от большинства других измеряемых при геофизических исследованиях параметров своей случайной природой. В связи с этим, в частности, серии измерений, выполненных в идентичных условиях, невозможно охарактеризовать идентичными численными результатами. Таким образом, ни одному единичному измерению нельзя придавать большее значение, чем любому другому в тех случаях, когда, как при съемке, частота импульсов относительно невелика, а неопределенность, выраженная в виде стандартного отклонения, значительно больше. В связи с подобной особенностью радиометрии для усреднения данных был принят следующий метод.

Площадь, результаты картирования которой рассматриваются в настоящей статье, была покрыта контрольной сетью точек 100×50 , перекрывающей съемочные профили. Все данные по точкам наблюдений внутри окружности

радиусом 0,4 мили с центром в каждой точке контрольной сети усреднялись. Эти окружности подбирались таким образом, что в среднее входили определения с трех смежных съемочных профилей. Такие средние частоты импульсов основаны на 20—40 точках наблюдений на одну точку контрольной сети. Количество используемых при этом измерений зависит от реальных соотношений трасс съемочных профилей по отношению друг к другу. Некоторые неправильности в пространственном положении съемочных профилей ликвидировать не удастся. Средние значения выводятся для каждого из четырех определяемых радиометрических параметров — суммарной частоты импульсов, содержания калия, eU , eTh . Средние величины контрольной сети используются затем при построении изолиний. Математическая обработка этих данных осуществляется с использованием бикубической сплайн-функции, что позволяет единообразно интерполировать величины по всем точкам. Программа для такой математической процедуры была разработана Холройдом и Бхаттачарией [10]. Интервалы между изолиниями избраны для каждого параметра разные. В том виде, как они приведены в настоящей статье, планы изолиний выполнены по данным откорректированных частот импульсов соответствующих элементов. При обработке суммарной частоты импульсов производилась единственная корректировка — на вариации изменения высоты полета над земной поверхностью.

Карты можно составлять в любом желательном масштабе. Так, для района Банкрофта площадью 14×28 миль было составлено две карты масштабом 1:50 000 и 1:126 720. Первый масштаб удобен тем, что он совпадает с масштабом топографических карт, на которые наносились непосредственно съемочные профили, а второй масштаб был принят в связи с тем, что он соответствует наиболее поздним опубликованным геологическим картам региона. Во всех случаях планы изолиний воспроизводились на прозрачном покрытии основы карты.

Карты. Перед тем как рассмотреть результаты проведенных исследований, целесообразно кратко обсудить некоторые более ранние работы. При решении большинства геологических задач данные по количественному распределению элементов на земной поверхности приобретают значение лишь в связи с распределением элементов в коренных горных породах того же региона. При изучении радиоактивности холмистого региона южной окраины Канадского щита была показана тесная связь радиометрических характеристик коренных по-

род и перекрывающих их наносов [3, 5]. Независимо от этих работ недавно была установлена остаточная природа почв Банкрофтского района [8]. Здесь для двух участков, расположенных в нескольких милях южнее площади, подвергнутой экспериментальной аэроспектрометрической съемке, было показано сходство вариаций различных физических, химических и минералогических параметров у почв, развитых на мраморах и на гранитах и у самих этих коренных пород. Поскольку в большинстве районов у границ Канадского щита от 70 до 95% площади покрыто наносами, радиоактивность земной поверхности здесь определяется преимущественно составом этих образований. Однако только что упомянутая непосредственная связь составов наносов и подстилающих их коренных пород позволяет использовать аэrorадиометрию в качестве метода съемки.

Ранее уже отмечалась [5] возможность получения хорошей корреляции радиометрических определений в воздухе и на Земле, установленная специальными измерениями в 15 участках в пределах района, результаты съемки которого обсуждаются в настоящей статье.

В качестве основы для карт, иллюстрирующих настоящую статью, принята геологическая карта района Банкрофта (Рудное управление Онтарио, 1957b). На построенной схематической основе отражено распространение следующих главных типов пород: гранито-гнейсов, гранитов, сиенитов и нефелиновых сиенитов, основных пород (габбро, амфиболитов, пироксенитов), мраморов и метаосадочных пород. Площадь коренных выходов по отношению ко всей площади, занимаемой данным типом пород, составляет от 20% для гранитов до 5% для мраморов. На карте видно преобладающее северо-восточное региональное простирание пород, связанное преимущественно с купольной структурой массива гранитов и сиенитов Дир-Лейк, расположенного в средней части западной половины рассматриваемого блока. В пределах закартированной площади расположены два крупных (Бикрофт и Фарадей) и одно небольшое (Грейхоук) урановые месторождения, а также несколько разведываемых рудопроявлений этого элемента.

В рудном районе Банкрофта установлено присутствие ряда радиоактивных минералов. Наиболее важное значение из них имеют уранинит-торианит, торит, ураноторит, бетафит, эвксинит, ортит и циркон. Детальные сведения о распространении этих минералов в регионе можно найти в работе Сеттерли [12]. В связи с ограничениями публикации данных по радио-

активным элементам в настоящей статье приведены схематизированные карты уменьшенного масштаба. При этом для наглядности были укрупнены интервалы изолиний и использована тональная раскраска.

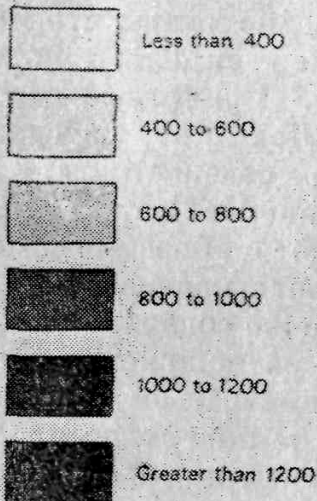
Общая радиоактивность. До недавнего прошлого радиометрические данные ограничивались определением общей радиоактивности. Этот параметр пропорционален суммарному содержанию калия, урана и тория. Высокая частота импульсов всего спектра обуславливает большую статистическую точность, чем та, которую можно получить при измерении излучений отдельных частей спектра. В связи с этим на картах общей радиоактивности удается выделить больше градаций, чем на картах распределения отдельных элементов. Ранее уже было показано [14, 11, 5], что большинство геологических параметров закономерно соотносится с распределением калия, урана и тория, и, таким образом, общая радиоактивность отражает в целом вариации состава (и распространение) горных пород.

На фиг. 4 показана карта общей радиоактивности района Банкрофта, на которой контурами дана геологическая основа: участки наименьшей радиоактивности совпадают с площадями, занятыми крупными озерами и болотами. На оригинальной карте, упрощенный вариант которой приведен здесь, особенно четко видно совпадение участков минимальной радиоактивности с главными озерами. Это свидетельствует о должной точности методики картирования и составления карт для данного масштаба. Две наиболее крупные положительные аномалии совпадают с площадями, занятыми отводами рудников Бикрофт и Фарадей, примыкающими к ним обогатительными фабриками, отвалами и сточными водоемами. На карте можно видеть, что изолинии общей радиоактивности обнаруживают общую связь с площадями развития главных типов пород и направлением структур района.

Особенно однородны радиометрические характеристики гнейсов в северной части района, зоны развития поздних гранитов и сиенитов, протягивающейся поперек средней части закартированной площади, а также мраморов в юго-восточной части района. Различим по радиоактивности гранитный массив западнее Коу-Хилл у южной границы площади. Однако во многих деталях наблюдаются расхождения между геологической и радиометрической картами. По данным радиометрии можно было бы предположить отличные от действительно существующих особенности геологического строения района. Так, зона максимальной радиоак-

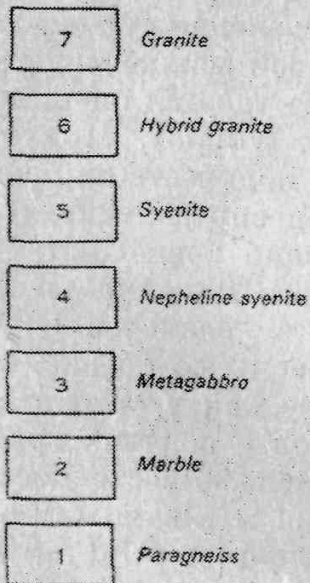
LEGEND

Total Surface Radioactivity Map
(counts per half second)



Ground survey sites (1968) (S)
 Radioactive mineral occurrence X
 Darnley A.G. and Grasty R.L.

Geology



Geology taken from Ontario Department
of Mines Map No. 1957-b



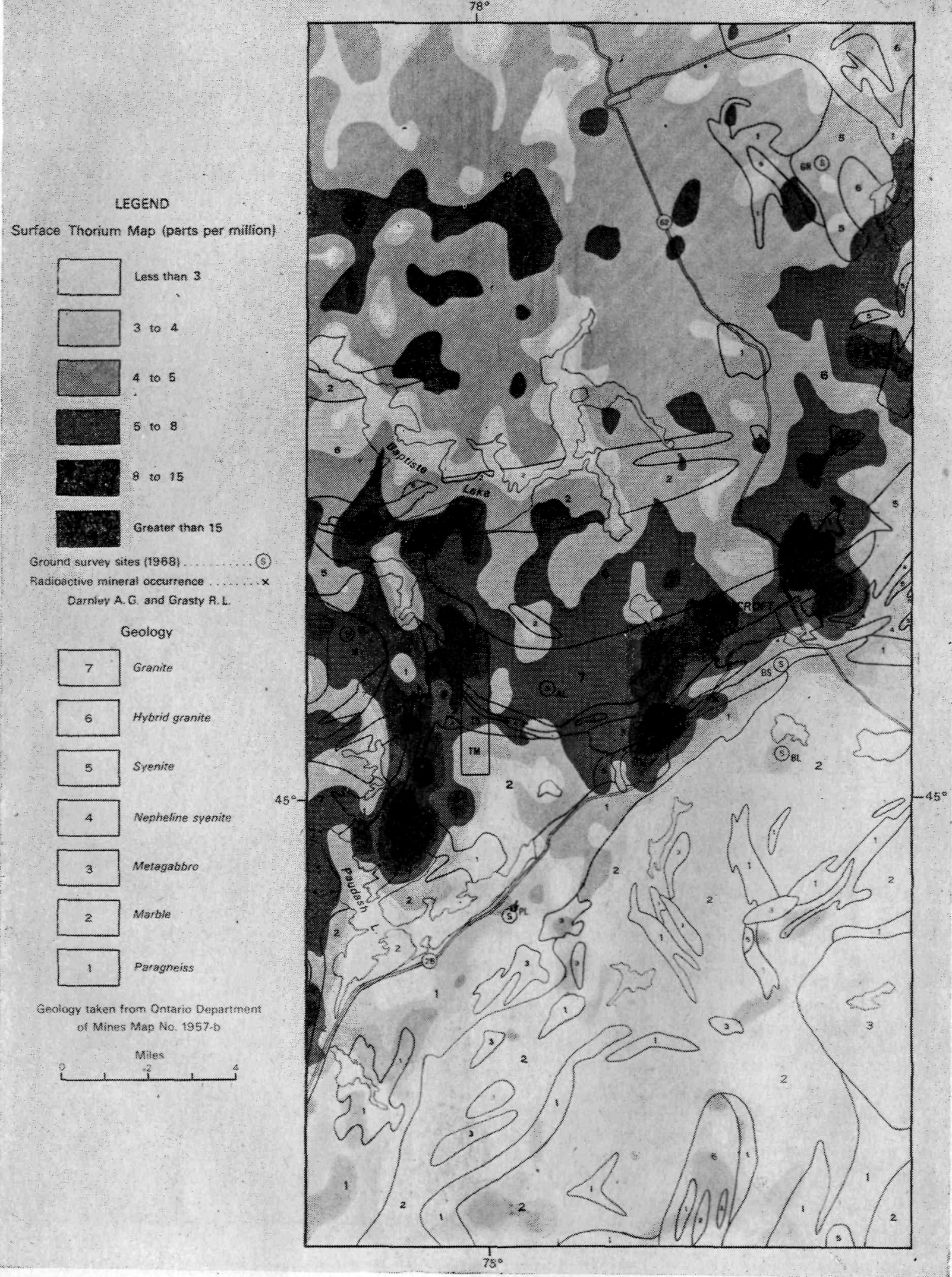
ФИГ. 4. Карта общей радиоактивности района Банкрофта.
 Крестиками на этой и следующих фигурах отмечены рудопроявления радиоактивных минералов, описанные Сеттерли [12].
 Значком s в кружочке обозначены участки наземной съемки 1968 г. Прямоугольником в средней части западной половины
 карты выделен испытательный полигон, описанный Дарнли и Флитом [3]. Оттенками от белого до черного показаны градации
 общей радиоактивности земной поверхности (в числе импульсов в 0,5 с).

тивности отклоняется на северо-восток от границы между сиенитами и поздними гранитами, которая пересекает центральную часть района. Две полосы мраморов, протягивающиеся в широтном направлении в окрестностях озера Баптист по своей радиоактивности не отличаются от вмещающих их гнейсов. Аналогичным образом обширная площадь, занятая выходами габбро на юго-востоке района, неотличима от окружающих мраморов. По данным наземных спектрометрических исследований, мраморы лишь в отдельных участках отличаются от габбро по общей радиоактивности. В образцах мраморов, отобранных в районе озера Баптист, присутствует значительное количество тонких жилок розового калишпата. Вероятно, на этом участке, сквозь мраморы просачивались минерализующие растворы, с которыми в них поступили такие количества калия, урана и тория, что эти породы стали здесь неотличимы по радиометрическим характеристикам от вмещающих гнейсов. Необходимо отметить, что еще в 1910 г. Адамс и Барлоу [1] в своем петрологическом описании района привели доказательства миграции и привноса щелочных элементов в подвижную зону вокруг контакта сиенитов с поздними гранитами.

Карта распределения «тория». На фиг. 5 показано распределение eTh в пределах района Банкрофта на земной поверхности. На этой карте выделено шесть градаций содержания «тория». Оценка содержаний производилась по методике, рассмотренной выше. Необходимо помнить, что эти цифры отражают среднее содержание на поверхности безотносительно к природе развитых на ней образований. Максимальные содержания eTh , превышающие 15 млн^{-1} , совпадают с рудничными отводами месторождений Бикрофт (озеро Сентр) и Фарадей. Аномалия, приуроченная к месторождению Бикрофт, протягивается в северном направлении к отработанному месторождению Крофт. Карта распределения тория в общем коррелируется с геологией района. Площади развития мраморов и габбро с неправильными линзами метаосадочных пород в юго-восточной части района обычно характеризуются содержанием eTh менее 3 млн^{-1} . Габбро по содержанию eTh выделить не удастся, что установлено и наземными определениями в ряде районов. Содержание eTh в гнейсах северной части района обычно колеблется от 3 млн^{-1} до 5 млн^{-1} . Наиболее резкие колебания eTh от 5 млн^{-1} до 15 млн^{-1} приурочены к зоне, в общем следующей границе между сиенитами и наиболее поздними гранитами (Фарадей и Сентр, В промежуточной зоне, расположенной между

гнейсами и поздними гранитами, имеются пятна с содержанием eTh $5-8 \text{ млн}^{-1}$. С этой же промежуточной зоной связана, вероятно, и другая полоса с содержанием выше 5 млн^{-1} , которая протягивается в широтном направлении севернее озера Баптист и не совпадает с площадями развития ни одного из главных типов пород района, выделенных на геологической карте. Это позволяет предполагать, что на геологической карте удастся выделить дополнительные подразделения. Гранитные массивы Коу-Хилл и Сайлент-Лейк по содержанию «тория» близки к гнейсам северной части района. Площади с содержанием eTh от 3 млн^{-1} до 4 млн^{-1} отчасти совпадают с областью развития метаосадочных пород, протягивающейся на юго-запад от Фарадея. Такие же содержания характерны и для участков, расположенных между зонами с повышенным количеством тория и нулевым его содержанием на поверхности, например озерами. В дальнейшем при совершенствовании методики усреднения данных измерений, очевидно, удастся избежать появления на картах таких зон, исключив из усредняемых величин точки наблюдений над озерами.

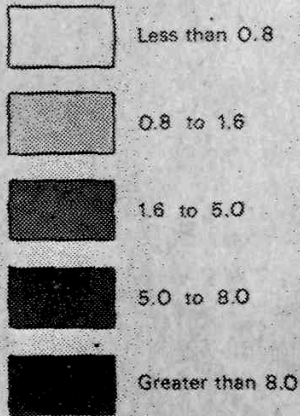
Карта распределения «урана». На фиг. 6 приводится карта распределения «урана» в районе Банкрофта, на которой можно видеть, что распределение «урана» не удастся оценить с такой же точностью, как «тория». Приходится ограничиться меньшим количеством градаций по его содержанию. В распределении «урана» проявляются те же общие тенденции, что и у «тория», но участки его максимальной концентрации имеют меньшие размеры. Они располагаются в пределах зоны со средней шириной 2—3 мили и, так же как у «тория», тяготеют к контакту сиенитов и поздних гранитов. Изолинии подчеркивают северо-восточное структурное направление. Как и можно было ожидать, наибольшие содержания eU ($>8 \text{ млн}^{-1}$) приходятся на территории главных месторождений и расположенных поблизости от них фабрик. Обособленные участки высоких содержаний ($6-8 \text{ млн}^{-1}$) совпадают с Грейхоукским рудопроявлением западнее озера Бау, где урановые минералы установлены непосредственно в поверхностных выходах, а также с участком западнее озера Албион, на котором в гранитах присутствуют небольшие сегрегации пегматитового материала. Граниты массива Коу-Хилл, очевидно, более ураноносны, нежели гнейсы северной части района, хотя в этом теле и имеются многочисленные мелкие островки, в пределах которых содержание eU такое же, как в гнейсах. Напомним, что содержания «тория» в гранитах Коу-Хилл и гнейсах были очень близкими. Содержа-



ФИГ. 5. Карта распределения тория в районе Банкрофта. Оттенками от белого до черного показаны градации средних содержаний eTh (в млн⁻¹).

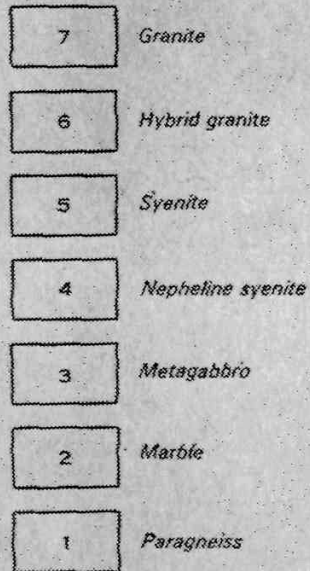
78°

LEGEND
Surface Uranium Map (parts per million)

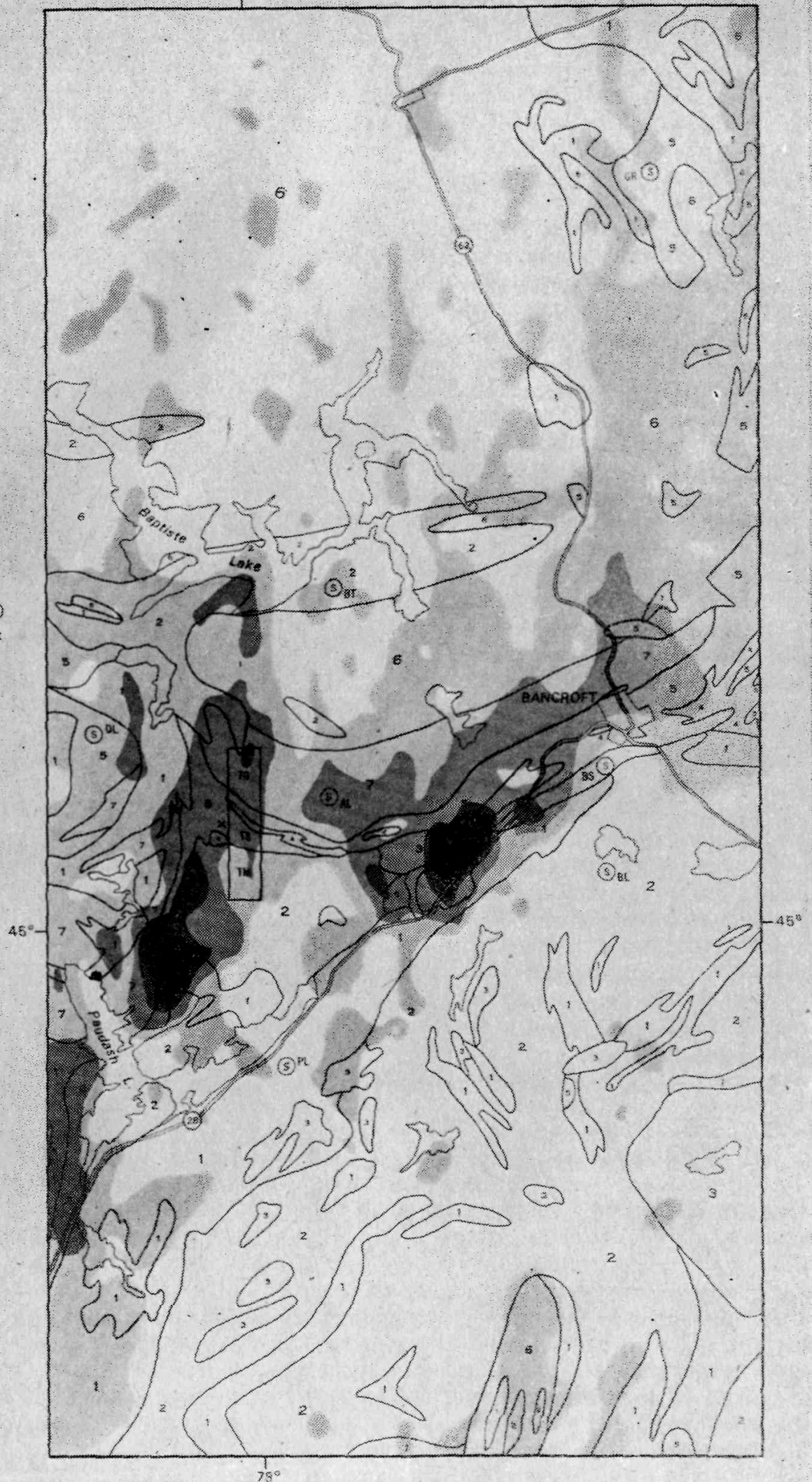


Ground survey sites (1968) (S)
Radioactive mineral occurrence x
Darnley A.G. and Grasty R.L.

Geology



Geology taken from Ontario Department of Mines Map No. 1957-b



78°

ФИГ. 6. Карта распределения урана в районе Банкрофта.

Две главные положительные аномалии приурочены к отводам рудников Бикрофт (левая) и Фарадей (правая). Восточнее месторождения Фарадей расположено рудопроявление Грейхоук. Оттенками от белого до черного показаны градации средних содержаний урана (в млн⁻¹).

ние eU (и eTh) в массиве сиенитов, показанном на геологической карте в приходе Монтигл северо-западнее озера Салмон-Троут, значительно ниже, чем в других сиенитовых интрузивах района, что позволяет предполагать для них несколько иное происхождение. В общем по содержанию «урана» гнейсы и мраморы близки.

Карта распределения калия. Пределы колебания содержания калия значительно уже, чем у тория и урана, что и следовало ожидать для элемента, входящего в больших количествах в несколько обычных породо- и почвообразующих минералов. Наивысшие концентрации этого элемента опять-таки приурочены к обширному участку выходящих на поверхность в окрестностях главных месторождений пород (фиг. 7). В пределах этого участка содержание калия превышает 3%. Адамс и Барлоу [1], а позднее другие исследователи, в частности Тилли [13], обращали внимание на высокое содержание натрия в щелочных сиенитах и ассоциирующих с ними нефелинсодержащих породах района Банкрофта. Калий в этих породах присутствует в меньшем количестве, чем натрий, но его содержания тем не менее достаточно велики, о чем свидетельствуют опубликованные химические анализы сиенитов [1]. Высокие содержания калия (2—3% по данным аэросъемки) характерны для прерывистой зоны в области развития сиенитов и поздних гранитов. В других участках распространения гранитов, а также гнейсов содержание калия колеблется от 1,5 до 2%. В областях развития мраморов, метасадочных пород и габбро содержание калия колеблется от 1,0 до 1,5%. Содержание K в массиве гранитов Сайлент-Лейк ниже, чем в других интрузивах. Неопубликованные данные по наземным исследованиям района Банкрофта свидетельствуют, что расхождения в содержании в коренных породах и перекрывающих их наносах резче проявляются для калия, чем для урана и тория. В наносах различия содержания калия коренных пород заметно нивелируются. Тем не менее аэросъемка позволяет выявить несомненные градации в распределении калия, которые в общем удается увязать с геологией коренных пород.

Карты отношений элементов. Исходя из данных поисков минеральных месторождений и с металлогенической точки зрения отношения элементов имеют более важное значение, чем абсолютные их содержания. Карты распределения элементов в абсолютных их содержаниях могут быть полезными для разграничения типов пород и выявления общих структурных черт района, однако они не всегда наиболее эффек-

тивны как инструмент поисков локальных особенно высоких концентраций. Рудные месторождения — это аномальные скопления отдельных элементов в земной коре, возникшие в результате проявления процессов их предпочтительной концентрации. Так, для всех промышленных урановых месторождений характерна предпочтительная концентрация урана по сравнению с торием. Во всех таких случаях уран по сравнению с калием концентрируется интенсивнее. Содержание калия в горных породах может меняться не более чем в 10 раз, тогда как для возникновения промышленно интересных концентраций содержание урана должно возрасти не менее чем в 100 раз.

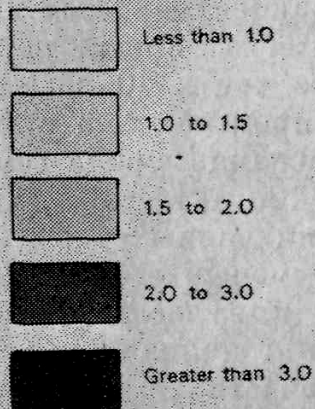
В процессе усреднения данных аэросъемки при составлении карт уменьшается изменчивость статистики частот импульсов и нивелируется влияние рельефа и наличие коренных выходов. Тем не менее в участках с малым количеством коренных выходов и мощными наносами абсолютная величина частоты импульсов должна быть очень небольшой. Использование отношений содержаний элементов сильно снижает роль величины частот импульсов как фактора геохимической оценки и вместе с тем позволяет четче расшифровывать геохимический баланс в коренных породах. Ранее уже указывалось [6], что отношение урана к торию в радиоактивных минералах отражает их промышленное значение. Вместе с тем также было показано, что в 17 точках наблюдения из 19 в районе Банкрофта уран-калиевое и уран-ториевое отношения остаются довольно устойчивыми независимо от типов развитых в этих точках пород. Значительное возрастание величины этих отношений наблюдалось лишь в участках с известными локальными концентрациями урановых минералов.

Сеттерли [12] привел 17 химических анализов минералов изоморфной серии уранинит — торинит из образцов, отобранных в районе Банкрофта. Весьма примечательно, что в образцах из промышленных месторождений уран-ториевое отношение было выше 0,5. Наиболее распространенный радиоактивный минерал района — ураноторит, в котором торий преобладает над ураном. Однако в анализах Сеттерли наблюдается явная тенденция к увеличению отношения U/Th в этом минерале в образцах из промышленных месторождений по сравнению с образцами из непромышленных рудопроявлений. Для интерпретации данных гамма-спектрометрических исследований важно подчеркнуть, что в эксплуатирующихся урановых месторождениях с содержаниями этого элемента выше среднего отношение U/Th в урановых

78°

LEGEND

Surface Potassium Map (per cent)

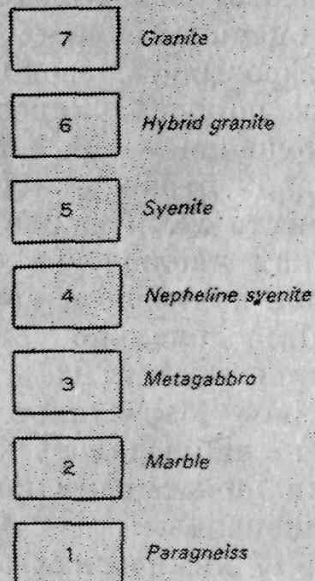


Ground survey sites (1968) (S)

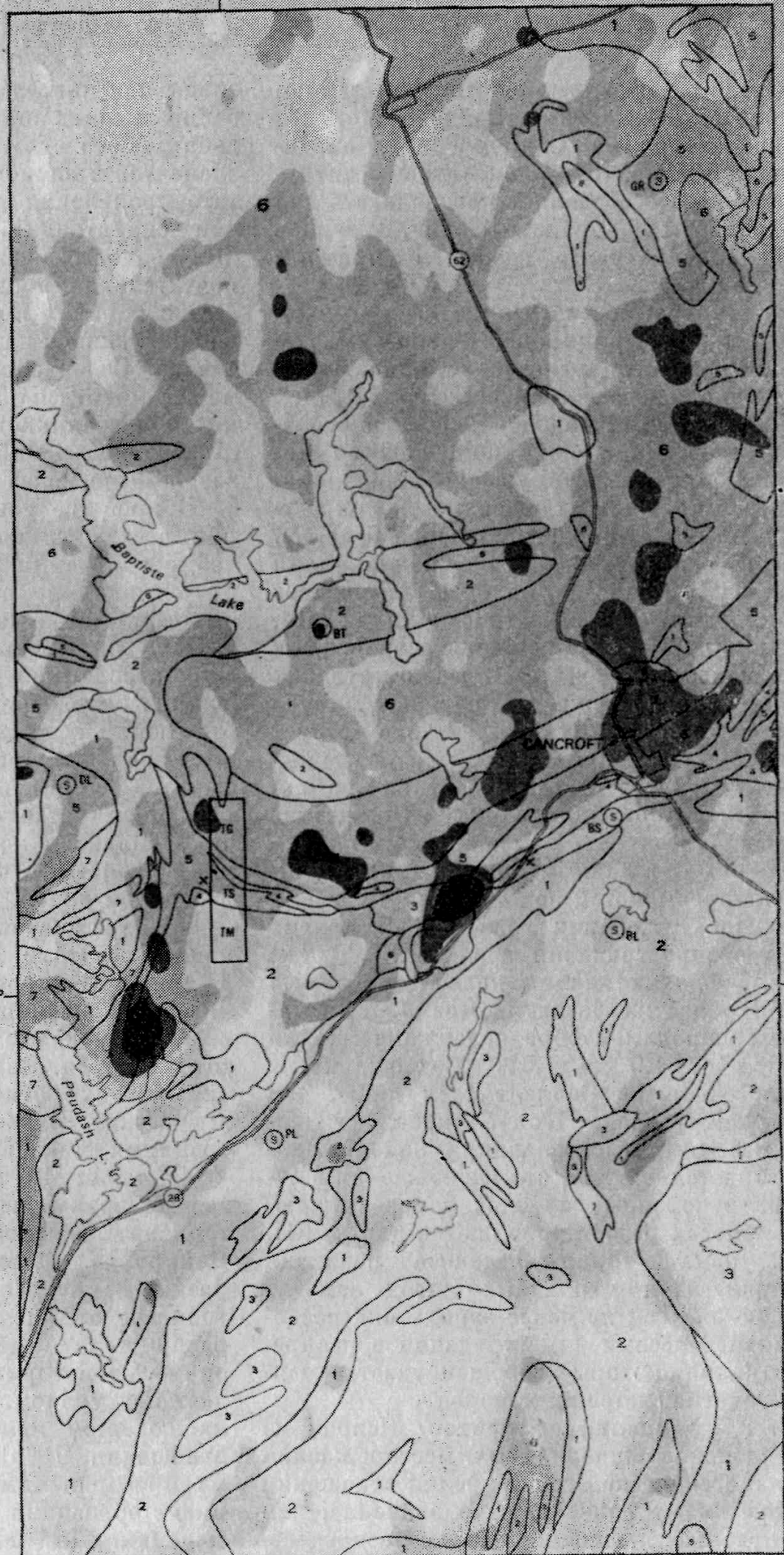
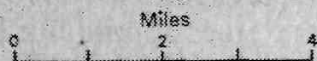
Radioactive mineral occurrence x

Darnley A. G. and Grasty R. L.

Geology



Geology taken from Ontario Department of Mines Map No. 1957-b



45°

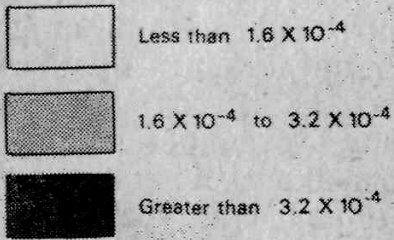
78°

ФИГ. 7. Карта распределения калия в районе Банкрофта. Оттенками от белого до черного показаны градации средних содержаний калия (в %).

78°

LEGEND

Uranium : Potassium Ratio Map

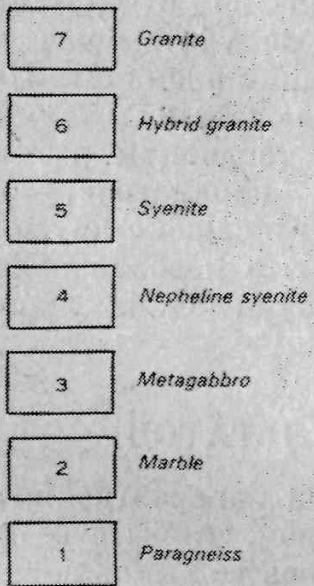


Ground survey sites (1968) (S)

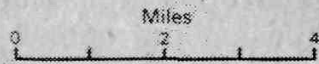
Radioactive mineral occurrence x

Darnley A.G. and Grasty R.L.

Geology



Geology taken from Ontario Department of Mines Map No. 1957-b



78°

ФИГ. 8. Карта распределения величин уран-калиевого отношения в районе Банкрофта. Отношение U/K дано в величинах относительных содержаний.

минералах смещено в сторону первого элемента.

На фиг. 8 дана карта вариаций уран-калиевого отношения в районе Банкрофта. Показаны лишь участки, в которых величина этого отношения превышает $3,2 \times 10^{-4}$. Гейер и Роджерс [9] показали, что в нескольких сериях магматических пород средняя величина отношения U/K колеблется от $0,6 \times 10^{-4}$ до $1,2 \times 10^{-4}$. Эти цифры получены на основании данных лабораторных анализов. В районе Банкрофта величина отношения U/K вне аномальной зоны, ассоциирующей с поздними гранитами, составляет 0,6. Аномальные величины этого отношения явно связаны с месторождениями Бикрофт и Фарадей. По этой же величине устанавливается и рудопроявление Грейхоук, расположенное восточнее Фарадея. Среди других положительных аномалий можно отметить участок испытательной взлетной площадки Геологической службы Канады, где производились экспериментальные исследования и известно несколько мелких выходов с урановой минерализацией. Еще одна аномалия располагается в гранитах непосредственно северо-восточнее Банкрофта, где также выявлены мелкие ураноносные жилки.

Интересно сравнить фиг. 8 и 9, из которых последняя представляет собой карту аномалий отношения торий/калий. На фиг. 9 также показаны только площади, в которых величина отношения Th/K превышает нормальные пределы ($>4,6 \times 10^{-4}$). Фоновая величина этого отношения для закартированной площади составляет $3,0 \times 10^{-4}$. Гейер и Роджерс в цитированной выше работе отмечали средние величины отношения Th/K для различных серий изверженных горных пород в пределах от $2,8 \times 10^{-4}$ до $4,2 \times 10^{-4}$. При сопоставлении карт отношений U/K и Th/K можно видеть, что зона максимальной концентрации тория смещена по отношению к такой же зоне урана. В общем зона обогащения торием смещена на север и запад. Для интерпретации этих соотношений необходимы дальнейшие более детальные исследования.

Поскольку для района Банкрофта характерны явный привнос тория и урановая минерализация, особый интерес представляет отношение уран/торий. На фиг. 10 приведена карта распределения величин этого отношения, причем показаны только площади, на которых его величина составляет более 0,4. Такие участки имеют общую площадь 8 кв. миль, что составляет 2% от всей закартированной территории. Положительные аномалии отношения U/Th тесно совпадают с аномалиями отношения U/K,

но занимают еще меньшие площади. Несколько южнее бетафитового проявления Силвер-Крейтер при наземной радиометрической съемке выявлены мелкие урановые аномалии в полосе мраморов в пределах испытательной взлетной площадки Геологической службы Канады. Эти аномалии, показанные на карте Дернли и Флита [3], идентифицируются и на карте отношения U/Th. Такого рода соотношения представляются очень важными, поскольку они свидетельствуют, что аномалии отношения U/Th, установленные аэрогаммасъемкой, фиксируют очень мелкие объекты, которые в определенных условиях могут представить практический интерес.

Отношение U/Th представляется более существенным, чем отношение U/K, как индикатор промышленных месторождений урана, хотя второй из этих параметров и дает на картах более широкие ореолы. Желательно рассматривать оба эти отношения.

Выше уже отмечалось, что при детальном рассмотрении профилей по отдельным съемочным линиям можно получить более точную информацию о локализации аномалий. Цель же составления карт заключается в суммарной характеристике общих тенденций распределения радиометрических параметров, которые могут быть рассмотрены в связи с другими геологическими данными, что невозможно по существу при использовании одних лишь профилей.

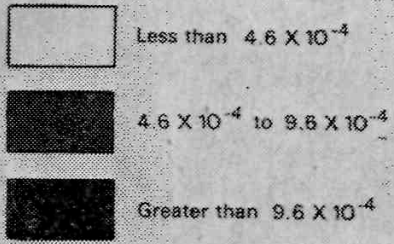
ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Эффективная система поисков должна быть настолько чувствительной, чтобы с ее использованием обнаруживались не выходящие на поверхность рудные объекты, однако вместе с тем она должна позволять быстро устанавливать среди них имеющие некоторое промышленное значение. Стоимость определения общей радиоактивности составляет 25—30% стоимости высокочувствительной аэрогаммаспектрометрической съемки. Однако в связи с отсутствием селективного определения отдельных элементов выявляется излишне большое количество аномалий, подлежащих наземному изучению. В таких условиях плохо вскрытая радиоактивная минерализация почти наверняка будет пропущена. Практическое значение таких аномалий можно оценить лишь на основании относительных концентраций ведущих элементов, например по величинам отношений U/K и U/Th. Результаты аэросъемки района Банкрофта позволяют считать, что при совместном использовании карт общей радиоактивности и

78°

LEGEND

Thorium : Potassium Ratio Map

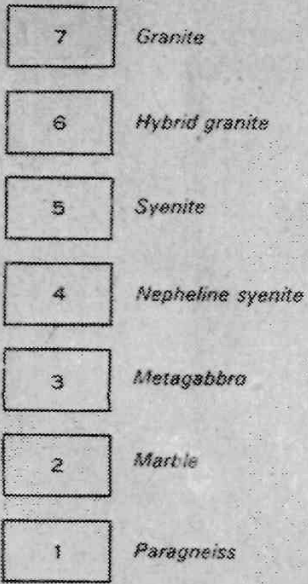


Ground survey sites (1968) (S)

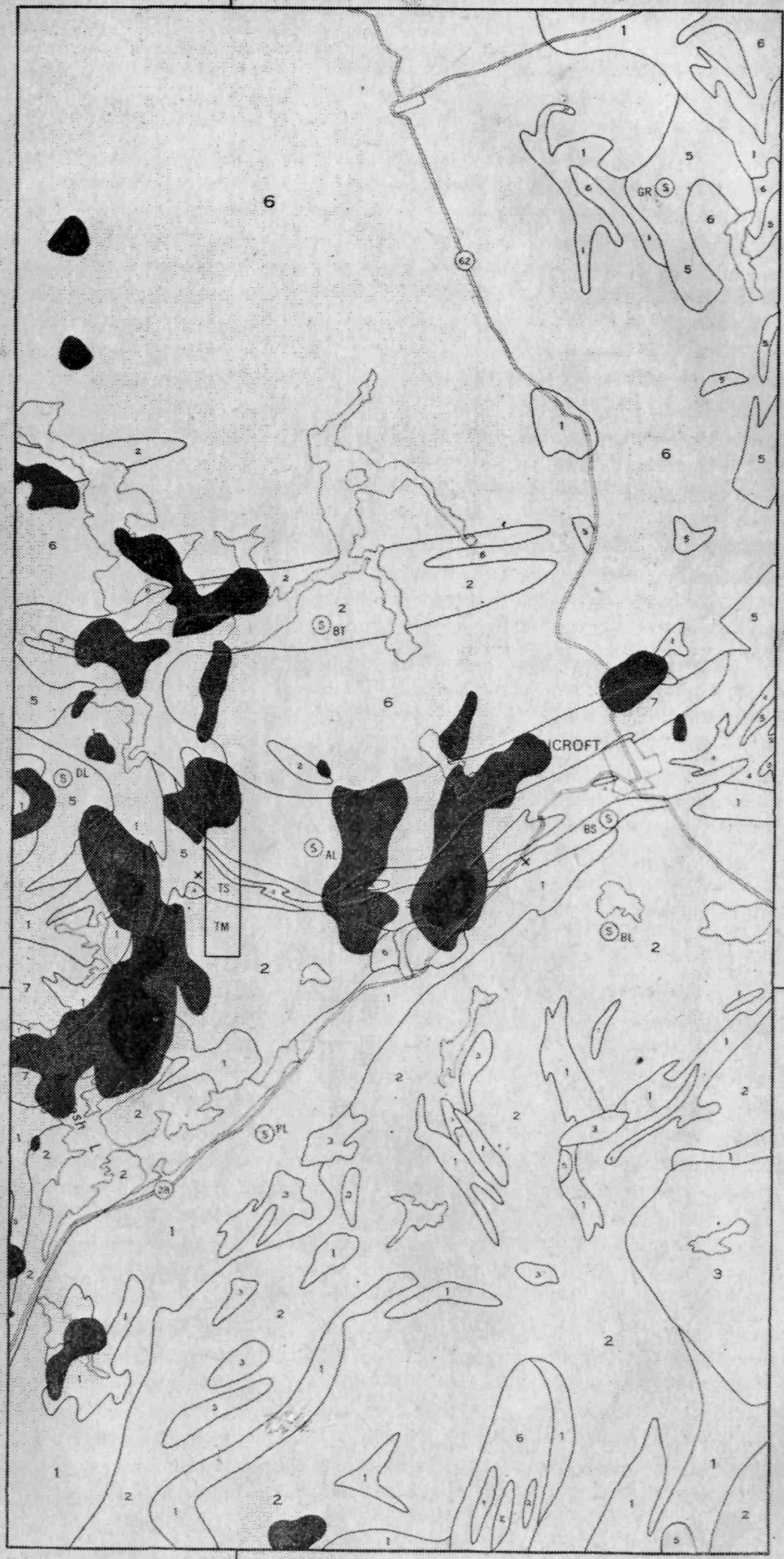
Radioactive mineral occurrence x

Darnley A. G. and Grasty R. L.

Geology



Geology taken from Ontario Department of Mines Map No. 1957-b



78°

ФИГ. 9. Карта распределения величин торий-калиевого отношения в районе Банкрофта. Отметим ложную положительную аномалию над озером Баптист, которая обусловлена относительно высоким содержанием тория на юго-западном побережье озера и различным уменьшением интенсивности радиоактивности калия и тория над озером. Отношение Th/K дано в величинах относительных содержаний.

78°

LEGEND

Uranium : Thorium Ratio Map

- Less than 0.4
- 0.4 to 0.5
- Greater than 0.5

- Ground survey sites (1968) (S)
- Radioactive mineral occurrence x
- Darnley A. G. and Grasty R. L.

Geology

- 7 Granite
- 6 Hybrid granite
- 5 Syenite
- 4 Nepheline syenite
- 3 Metagabbro
- 2 Marble
- 1 Paragneiss

Geology taken from Ontario Department of Mines Map No. 1957-b



78°

ФИГ. 10. Карта распределения величин уран-ториевого отношения в районе Банкрофта. Отношение U/Th дано в величинах относительных содержаний.

отношения U/Th удается правильно избрать аномалии для дальнейших детальных наземных исследований. В связи с высокой стоимостью наземных детальных поисковых работ относительная дороговизна гамма-спектрометрии не увеличивает общей стоимости поисков.

Тем не менее представляется целесообразным в новых районах вначале проводить рекогносцировочную съемку с определением только общей радиоактивности и по результатам этого этапа уже намечать относительно узкие участки, наиболее желательные для аэрогаммаспектрометрической съемки. При такой этапизации поисков съемку с определением общей радиоактивности можно проводить более быстро с применением менее сложного оборудования и с менее строгим контролем. Такая съемка, как об этом свидетельствует карта общей радиоактивности района Банкрофта, достаточно точно соответствует геологическому строению подвгнутой изучению территории.

Карты распределения K, eU и eTh, составленные по данным аэрогаммаспектрометрии, на первый взгляд не приносят большой дополнительной информации к общей геологической карте, полученной в результате определения общей радиоактивности. Однако по этим картам удается получить ценные сведения о проявлении необычных геохимических процессов, с которыми может быть связана не только урановая минерализация. Избыточный калий обычно присутствует в районах гидротермальной деятельности, например в районах с медно-порфировыми месторождениями. Наоборот, содержания калия аномально понижены в участках гидротермального изменения определенных типов. Торий четко ассоциирует с большинством карбонатитов и может служить хорошим индикатором редкоземельной минерализации. В пределах Канадского щита по распределению тория были отбиты некоторые линейные зоны разломов. Гамма-спектрометрия также иногда позволяет предполагать, что некоторые внешне очень сходные породы в действительности имеют различное происхождение или историю становления. Так, нефелиновые сиениты массива Блу-Маунтин, расположенного в 10 милях южнее территории, результаты картирования которой рассмотрены в настоящей статье, имеют аномально низкие величины отношений U/K и U/Th по сравнению с нормальными значениями этих параметров для данного типа пород и для других сиенитов района Банкрофта [5].

В заключение отметим, что гамма-лучевая спектрометрия высокой чувствительности представляет собой основу метода составления геохимических карт трех элементов посредством аэросъемки. Получаемая при этом информация имеет как промышленное, так и научное значение. Одна из наиболее заманчивых перспектив — распространение аэрогеохимических методов изучения на другие элементы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Adams F. D., Barlow A. E., *Geology of the Haliburton and Bancroft Areas, Ontario*, Geol. Surv. Canada, Mem. 6, 1910.
2. Charbonneau B. W., Darnley A. G., *Radioactive Precipitation and its Significance to High Sensitivity Gamma-ray Spectrometer Surveys*, Geol. Surv. Canada, Paper 70-1b, 1970.
3. Darnley A. G., Fleet M., *Evaluation of Airborne Gamma-ray Spectrometry in the Bancroft and Elliot Lake Areas of Ontario, Canada*, Proceedings, Fifth Symposium on Remote Sensing of Environment, Ann Arbor, Michigan, 833—853, 1968.
4. Darnley A. G., Bristow Q., Donhoffer D. K., *Airborne Gamma-ray Spectrometer Experiments over the Canadian Shield*, Nuclear Techniques and Mineral Resources, International Atomic Energy Agency, Vienna, 163—186, 1969.
5. Darnley A. G., *Airborne Gamma-ray Spectrometry*, CIM Bulletin, 63, № 694, 145—154, CIM Transactions, 73, 20—29, 1970.
6. Darnley A. G., Grasty R. L., Charbonneau B. W., *Highlights of GSC Airborne Gamma Spectrometry in 1969*, Can. Mining Jour., April 1970, 98—101, 1969.
7. Foote R. S., *Improvement in Airborne Gamma-Radiation Data Analyses for Anomalous Radiation by Removal of Environmental and Pedologic Radiation Changes*, Nuclear Techniques and Mineral Resources, I.A.E.A., Vienna, 187—196, 1969.
8. Gillespie J. E., Protz R., *Evidence for the Residual Character of Two Soils, one on granite, one on limestone, in Peterborough County, Ontario*, Can. Journ. Earth Sci., 6, 1217—1225, 1969.
9. Heier K. S., Rogers J. J. W., *Radiometric Determination of Thorium, Uranium and Potassium in Basalts and in two Magmatic Differentiation Series*, Geochim. et Cosmochim. Acta, 27, 137—154.
10. Holroyd M. T., Bhattacharyya B. K., *Automatic Contouring of Geophysical Data Using Bicubic Spline Interpolation*, Geol. Surv. Canada, Paper 70—55, 1970.
11. Rogers J. J. W., Ragland P. C., *Variation of Thorium and Uranium in Selected Granitic Rocks*, Geochim. et Cosmochim. Acta, 25, 99—109, 1961.
12. Satterly J., *Radioactive Mineral Occurrences in the Bancroft Area*, Ann. Rep., Dept. Mines, 65, Pt. 6, for 1956, 1957.
13. Tilley C. E., *Problems of Alkali Rock Genesis*, Quart. Journ. Geol. Soc. 113, 323—360, 1958.
14. Whitfield J. M., Rogers J. J. W., Adams J. A. S., *The Relationship Between the Petrology and the Thorium and Uranium Contents of Some Granitic Rocks*, Geochim. et Cosmochim. Acta, 17, 248—271, 1959.

АЭРОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ПОИСКИ

О. Вейсс

Лондон, Англия

ВВЕДЕНИЕ

Методы аэрогеохимических поисков, основанные на магнитной и электромагнитной индукции и гамма-спектрометрии, превратились в важный инструмент поисков минеральных месторождений.

За исключением данных гамма-спектрометрии, все остальные аэрометоды не дают прямой информации о содержаниях металлов. Вместе с тем и посредством гамма-спектрометрии можно определять лишь уран, торий и калий.

Дистанционные аэрометоды, основанные на анализе паров, эманулирующих из рудных месторождений, позволяют только констатировать наличие минерализации без количественной оценки содержания металлов. Все упомянутые аэрометоды, конечно, полезны, но они остаются косвенными методами поисков руд металлов. Пособством этих методов выявляются аномалии, которые в подавляющем большинстве случаев обусловлены горными породами и скоплениями минералов, не имеющими промышленного значения. Во всех частях мира аэрометодами закартированы тысячи магнитных и электромагнитных аномалий, данные по которым теперь следует дополнить определениями аномалий паров. Последующая детализация такого огромного количества аномалий не проводится или проводится в сокращенных объемах из-за высокой стоимости. Тем не менее аэрометодами было выявлено уже несколько крупных новых рудных месторождений. В целом аэрометоды не могут заменить всех существующих методов поисков, но повышают их эффективность, снижают стоимость работ, особенно в случае применения методов с прямыми определениями содержания металлов в минерализованных районах.

При наземных исследованиях разработанные и внедренные геохимические методы поисков полностью удовлетворяют последнему отмеченному выше условию. Применение этих методов ограничено оценкой непосредственных выходов коренных горных пород и почв, образовавшихся при участии поверхностной минерализации. При опосковании таких объектов геохимические методы стали одним из наиболее важных инструментов поисковых работ.

Как и все остальные геологические и геофизические методы исследований, аэрогеохимическая методика поисков имеет свои преимущества и пределы применимости. Она позволяет производить прямое определение некоторых металлов в минерализованных выходах и почвах. Недостатки аэрометодов по сравнению с наземными заключаются в том, что они не могут применяться к площадям, перекрытым водой, снегом или мощной тропической растительностью. С другой стороны, важнейшие достоинства аэроразведки обусловлены возможностью ее проведения в таких труднодоступных участках, как крупные скальные выходы, каньоны, горные пики и т. д., а также большой скоростью опробования, достигающей 100—200 миль/ч. Аэрогеохимические поиски могут быть использованы для уточнения природы магнитных и электромагнитных аномалий, выявленных аэросъемкой.

Новые методы позволяют в короткие сроки охватывать поисками крупные площади, а следовательно, в сочетании с регионально-геологическими данными они могут привести к выявлению новых металлогенических провинций. При скорости полета 120 миль/ч и расстоянии между профилями 1,5 км для опоскования площади в 10 000 кв. миль протяженность профилей составит 10 000 миль, для чего необходимо затратить 83 летных часа. Конечно, возникнут также те или иные затраты времени на полет от базы до района работ и обратно, которые в среднем можно оценить в 80 летных часов. Таким образом, в целом на аэрогеохимическое опосковывание площади в 10 000 кв. миль потребуется 20 000 миль полета в течение 160 ч. Эту работу при использовании одного самолета можно провести в течение двух месяцев, а при двух самолетах — за один месяц. Использование самолетов с большей скоростью полета соответственно уменьшит приведенные цифры.

Двумя самолетами при оптимальных условиях погоды за год (с тремя летними месяцами) можно покрыть аэрогеохимической разведкой площадь 30 000—40 000 кв. миль. В связи со столь резким увеличением площади поисков в сильной мере возрастает статистическая возможность открытия минерализованных районов.

ВОЗДУШНЫЕ ТЕЧЕНИЯ В ПРИПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ

При выветривании и эрозии возникают минеральные аэрозоли, взвеси мелких твердых частиц размером порядка 1 мкм. Эти частицы переносятся в вертикальном направлении в нижнем слое атмосферы турбулентными воздушными потоками. Подобные движения определяются преимущественно локальными различиями плотности воздуха. Приповерхностный слой атмосферы, в котором осуществляются обсуждаемые течения, имеет толщину 50—100 м. У однородного воздушного потока над ровной твердой поверхностью скорость равна нулю лишь непосредственно у этой поверхности, но на очень небольшом расстоянии от нее достигает величины, свойственной свободному течению. Таким образом, все резкое изменение скорости течения и соответственно вязкости происходит в тонком пограничном слое непосредственно у земной поверхности. Внутри этого слоя высокий градиент скорости течения и вязкость среды обуславливают значительную задержку частиц даже над совершенно ровной плоской поверхностью. В действительности же характер воздушного течения над поверхностью Земли еще более осложнен неровностями, которые приводят к возникновению вязко-вращательного турбулентного движения воздуха. Именно такая структура воздушных потоков приводит к проникновению в атмосферу тонких твердых частиц минералов горных пород и почвы размером около 1 мкм. В атмосфере у земной поверхности происходят резкие суточные вариации температуры, обусловленные противодействующими входящей коротковолновой и исходящей длинноволновой радиациями. Когда Солнце поднимается высоко, температура земной поверхности становится выше температуры воздуха. Это приводит к турбулентному движению воздуха, которое начинается вскоре после рассвета. Восходящее движение от поверхности нагретого менее плотного воздуха транспортирует в более высокие слои атмосферы минеральные частицы, турбулентно циркулировавшие в приповерхностном пограничном слое.

Только что отмеченная сложная циркуляция до настоящего времени не рассматривалась со строгими математическими расчетами. При решении уравнения движения Навье — Стокса получают частные дифференциальные уравнения второго порядка, решения которых не найдены. Медленное движение очень мелких частиц под действием гравитационных сил харак-

теризовано Стоксом математически как трансляционное перемещение сферы. С таким подходом можно определить инерционные члены уравнений для малых скоростей. Это решение известно под названием закона Стокса. По закону Стокса следует, что скорость свободного падения мелких частиц диаметром не более 0,1 мм настолько мала, что такие частицы могут оставаться во взвешенном состоянии в течение очень длительного периода времени. Дейвис приводит следующие значения времени релаксации τ и предельных скоростей сфер единицы плотности в воздухе при давлении в 1 атм и 20° С, вычисленных по уравнению Стокса:

мкм	τ , с	V_s , см/с
0,5	$1,02 \times 10^{-6}$	0,0010
1	$3,57 \times 10^{-6}$	0,0035
5	$7,95 \times 10^{-5}$	0,078
10	$3,057 \times 10^{-4}$	0,30

Параметр τ — это время, необходимое для того, чтобы частица освободилась от приложенной внешней силы и стала вести себя свободно.

Вблизи земной поверхности скорость ветра заметно варьирует. Ряд исследователей определяли флуктуации этой скорости в вертикальном и горизонтальном направлении. В зависимости от характера земной поверхности на скорость ветра влияют различные факторы. Установлено, что в непосредственной близости к земной поверхности в интервале от 25 до 500 см вертикальная составляющая воздушного потока уменьшается, хотя исследования тонкой структуры воздушных течений пока весьма неполны. Многие эмпирические данные побуждают сомневаться в справедливости допущений, обычно принимаемых в математическом анализе атмосферных турбулентных течений.

Вариации скорости ветра определяются не только прихотливыми ее флуктуациями у земной поверхности, но и правильными суточными колебаниями, которые во внутриконтинентальных областях обуславливают максимальную ее величину в нижнем слое в дневное время примерно около полудня. На высоте от 100 до 300 м ветер достигает максимальной силы ночью. В прибрежных районах нормальные суточные вариации ветра изменяются земным и морским бризами. В солнечные дни поверхность суши теплее, чем поверхность моря. Это обуславливает движения воздуха со стороны моря на сушу. Такой холодный морской воздух как бы выталкивает вверх теплый земной.

Ночью движение воздуха происходит в прямо противоположном порядке.

Другой локальный фактор, определяющий воздушную циркуляцию, — горные и долинные ветры. По мере подъема солнца склоны долины прогреваются и воздух движется вверх по склону, а затем стекает к центру долины. После полудня потоки воздуха, поднимающиеся по склонам долины, взаимодействуют с потоками, поднимающимися с равнин вверх по долине и постепенно исчезают. Вечером охлажденный воздух начинает двигаться вниз по склонам долины, создавая ветер, а поздно ночью возникает общедолинный поток,двигающийся по долине от верховья к низовью.

Приведенные выше сведения о циркуляции воздуха в приповерхностном слое атмосферы должны показать сложность процессов, которые обуславливают миграцию тонких минеральных частиц в атмосфере. Все эти факторы приводят в тому, что на высоте в несколько сотен футов удается отобрать пробы аэрозолей в количестве, достаточном для микрохимических определений содержания полезных компонентов.

ВОЗНИКНОВЕНИЕ МИНЕРАЛЬНЫХ АЭРОЗОЛЕЙ И ИХ ПЕРЕНОС

Твердые минерализованные частички размером около 1 мкм образуются в результате химических и физических процессов, действующих на минералы и горные породы при выветривании, и в связи с переносом энергии от крупных масс к меньшим.

Химические реакции некоторых минералов с водой выражаются в их выщелачивании. Физические эффекты бомбардировки и абразии выходов горных пород и руд дождем и ветром приводят к возникновению частиц, по своим размерам колеблющихся от видимых до микроскопических. В результате быстрой смены температур как коренные выходы, так и крупные обломки могут разрушаться и дезинтегрироваться.

В агломератах эродированных горных пород в результате воздействия ветра и дождя относительно крупные обломки перемешиваются, перемалываются с образованием в конечном счете частиц размером около 1 мкм, так называемых минеральных аэрозолей.

Твердые минеральные частицы размером более 1000 мкм транспортируются лишь в тонком пограничном приповерхностном слое ат-

мосферы. Этот способ переноса известен под названием «ползучести», или крипа.

Частицы меньших размеров (от 50 мкм до нескольких сотен микрон) могут отрываться от неровностей земной поверхности, а также от более крупных обломков и подниматься в воздух на высоту в несколько футов, падая затем обратно на землю. Этот процесс повторяется многократно.

Наконец, частицы менее 50 мкм в диаметре, отрывающиеся от крупных обломков, вовлекаются в вертикальное турбулентное движение воздуха. Поскольку вертикальный перенос в сильной мере определяется градиентом температуры в том же направлении, этот последний фактор имеет важное значение.

Перенос тонких частиц на большие высоты в атмосфере производится термическими потоками. Самые тонкие фракции частиц размером менее 50 мкм подчиняются закону Стокса и остаются во взвешенном состоянии даже в спокойном воздухе в течение длительного периода времени, оседая в соответствии с их предельными скоростями свободного падения. Сферическая частица с плотностью, равной единице, диаметром 1 мкм и с предельной скоростью падения 0,0035 см/с опускается с высоты 1 м в течение 50 мин. При падении с высоты 10 м такая частица будет оставаться в воздухе в течение 6 ч. За этот период мелкие частицы неоднократно подхватываются ветром и термическими потоками и увлекаются на все большую высоту и переносятся на большие расстояния.

Другой фактор, определяющий перенос мелких фракций минерализованных частиц, — распределение их по размерам на земной поверхности в связи с ее неровностями. На ровной поверхности частицы однородных размеров будут устойчивы по отношению к переносу даже при сильном ветре. Подвижности мелких частиц способствуют наличие агрегатов различных размеров и любые неровности земной поверхности.

Над коренными выходами минерализованных пород и над перекрывающей их почвой возникают облачка взвесей тонких частиц. Рассеяние их приводит к изменению концентрации и распределения по размерам минерализованных частиц в воздухе вокруг коренных выходов и перекрывающих их почв. Было установлено, что большая часть относительно крупных частиц концентрируется над их источником и в непосредственной близости к нему. Например, средние содержания пылевидных частиц, отобранных в течение одного дня из одной точки близ Ханфорда, США, распределались по высоте следующим образом (количество частиц на 1 куб. фут):

Высота, футы	Фракции, мкм		
	5-20	20-60	60-240
Близ поверхности	2600	760	75
50	1700	280	9
100	1200	100	3
400	800	90	1

Эти частицы имели региональное происхождение, включая и непосредственные окрестности точки наблюдения. Можно видеть, что крупные частицы сохранялись в воздухе близ земной поверхности и что наблюдается некоторая сортировка частиц по размерам как функция от высоты.

Распределение минеральных аэрозолей по отношению к коренным выходам отличается от только что приведенного примера, поскольку их источники составляют лишь небольшую долю крупных неминерализованных областей. В пределах площади 10 000 кв. миль, покрываемых аэрогеохимической разведкой, можно встретить минерализованные выходы площадью значительно менее 1 кв. мили (крупнее могут быть лишь выходы медно-порфировых руд). Таким образом, в пределах относительно крупных площадей минерализованные участки можно рассматривать как точечные источники аэрозолей. Распределение частиц по размерам вокруг таких точечных источников имеет узко локализованный характер как по вертикали, так и в горизонтальном направлении. Шлейфы минерализованных аэрозолей, поступающих из рудного выхода, в турбулентных и термических потоках поднимается в свободном воздухе прерывисто. Шлейфы перемещаются вокруг своего источника, т. е. коренного выхода, в результате изменения направлений ветра, но количество наиболее крупных минерализованных частиц неизменно достигает максимума непосредственно над крупным выходом и близости от него.

Предпринимались многочисленные попытки установить теоретические соотношения распределения аэрозолей в воздухе, т. е. их диффузии в атмосфере, и одновременно измеряемых скорости и турбулентности ветра, температуры и влажности. Такого рода теоретические исследования способствуют выявлению факторов, контролирующих диффузию, но не могут привести к установлению строгого общего закона. Строгое математическое обоснование диффузии аэрозолей пока невозможно в связи с ее зависимостью от многих локальных условий на земной поверхности и в воздухе.

Из всех теоретических аспектов диффузии аэрозолей наиболее очевидна роль предельной скорости свободного падения частиц. Выше уже отмечалась роль этого фактора, фиксируемая законом Стокса. Эта простая зависимость, однако, осложняется влиянием различий удельного веса частиц. В связи с частыми встречами траектории движения частиц могут определять движение других частиц, находящихся по соседству. Так, более крупные частицы могут увлекать в своем падении мелкие. Во всех случаях у этих частиц предельная скорость падения остается больше скорости рассеяния. Из этого следует, что крупные плотные частицы концентрируются поблизости от их коренного источника.

Минерализованные частицы переносятся в боковом направлении на большие расстояния, а затем отлагаются. Такие перемещенные частицы могут вновь поступать в атмосферу и дополнительно переноситься как в вертикальном, так и в горизонтальном направлениях, однако, несомненно, их концентрация при повторном переносе будет гораздо меньше, чем поблизости от первичного источника. Таким образом, минерализованный участок на земной поверхности фиксируется максимумами общего количества и особенно числа крупных минерализованных частиц в воздухе на фоне рассеянного их аэрозольного распределения в пределах относительно крупной площади.

ОТБОР ВОЗДУШНЫХ ПРОБ МИНЕРАЛИЗОВАННЫХ ЧАСТИЦ

При отборе проб минерализованных частиц с самолета должны учитываться некоторые специфические условия аэрогеохимических поисков.

Первая возникающая при таком опробовании проблема заключается в извлечении минимального количества вещества, которое позволяет произвести быстрый и надежный микроанализ с целью определения отдельных металлов, присутствующих в минерализованных частицах. В связи с этим приходится отфильтровывать большие объемы воздуха. Опробование следует производить на небольшой высоте от земной поверхности и при относительно высокой скорости полета. При таком высокоскоростном опробовании больших объемов возникает ряд специфических затруднений.

Поскольку, как это уже отмечалось, распределение частиц по размерам представляет собой важный индикатор наличия и положения минерализованных выходов, необходимо, чтобы при опробовании можно было определять раз-

меры частиц. Этим исключаются операции удаления частиц из коллекторов и их концентрации.

Материал, из которого изготовлены коллекторы, должен быть лишен загрязняющих примесей, особенно примесей металлов, определяемых при опробовании.

Эффективность отбора E представляет собой отношение количества частиц, фактически захваченных коллектором, к их максимальному числу, которое можно было бы захватить в том случае, если бы потоки воздуха не отклонялись коллекторами.

Высокоскоростное воздушное опробование с использованием больших количеств воздуха со взвесью частиц микронных размеров удовлетворяет всем перечисленным выше требованиям. Это достигается применением в качестве коллекторов тонких полимерных нитей, например нейлоновых лесок диаметром 0,15 мм и менее. Такие нити достаточно прочны, чтобы противостоять напору воздуха при скорости полета 100—200 миль/ч, они лишены загрязняющих примесей малых элементов и становятся весьма электростатичными при высокой скорости полета в воздухе. Электростатические силы сами по себе не способствуют захвату частиц, однако как только частица попадает в коллектор, соударяясь с ним, эти силы способствуют ее удержанию, создавая молекулярное трение и предотвращая ее отрыв даже сильным воздушным потоком. Таким образом, эффективность опробования нейлоновыми нитями при большой скорости полета в несколько раз выше, чем незаряженными коллекторами или полимерными же коллекторами, но экспонируемыми в потоке воздуха с небольшой скоростью.

Эффективность коллектора определяется тремя факторами:

- 1) распределением скоростей потока воздуха вокруг коллектора;
- 2) траекторией движения частиц, которая в свою очередь зависит от их массы, воздухоустойчивости, а также от формы и размеров коллектора;
- 3) прилипанием частиц к коллектору.

Полимерная нить по существу представляет собой тонкий цилиндр. Эффективность отбора таким тонким цилиндром может быть вычислена для частиц, подчиняющихся закону Стокса. Время релаксации (в секундах τ) таких частиц зависит от их плотности σ и радиуса a , а также от вязкости воздуха μ . При постоянной вязкости воздуха величина τ зависит функционально лишь от свойств самой частицы:

$$\tau = \frac{2}{9} \frac{a^2 \sigma}{\mu}.$$

Инерционный эффект частицы характеризуется пробегом стопорения $d_s = \tau V_0$, расстоянием, пройдя которое частица приходит в состояние покоя после поступления в спокойный воздух с некоторой скоростью V_0 .

Динамические соотношения частицы с полем воздушного потока выражаются параметром P :

$$P = \tau \frac{V_0}{L} = \frac{2}{9} \frac{a^2 \sigma V_0}{L},$$

где L — радиус цилиндрических коллекторов. P называют инерционным параметром.

Приведенные выше формулы приложимы к ламинарному потоку. В случае турбулентного движения эти соотношения сохраняют силу при относительно большем пробеге стопорения частицы по сравнению с размерами завихрений, а при обратных соотношениях этих двух величин частица выносятся.

Эффективность отбора E цилиндрическим коллектором функционально зависит от P (инерционного параметра частицы), Re (числа Рейнольдса) и отношения радиусов частицы и цилиндрического коллектора a/L . Число Рейнольдса выражает соотношение сил инерции и трения:

$$Re = \frac{\sigma V a}{\mu}.$$

Таким образом, большая скорость потока увеличивает эффективность отбора по мере возрастания параметра частицы P . Этот параметр возрастает также с уменьшением радиуса цилиндрического полимерного коллектора и с увеличением радиуса частиц. Кроме того, большая скорость движения увеличивает инерционный член числа Рейнольдса, а следовательно, также приводит к повышению эффективности захвата.

При воздушном опробовании скорость потока воздуха очень велика — 100—200 миль/ч. В связи с их большой прочностью в качестве коллекторов можно использовать даже очень тонкие полимерные трубки радиусом 0,005 см. Таким образом, эффективность отбора частиц коллекторами этого типа будет весьма высокой и возрастает с увеличением размера частиц.

Ряд исследователей определяли эффективность отбора цилиндрическими коллекторами как функцию от параметра частицы P для различных величин отношения $(L + a)/L$, которые в нашем случае лежат между 1 и 1,1.

Определим эффективность захвата относительно толстой трубки диаметром 0,04 см при скорости потока воздуха, т. е. скорости движения самолета, 120 миль/ч. Примем диаметр частицы равным 1 мкм, ее плотность равной 1,

а вязкость воздуха $18,3 \times 10^{-5}$ П.

$$P = \tau \frac{V_0}{L}; \quad \tau = \frac{2}{9} \frac{a^2 \sigma}{\mu} = \frac{2}{9} \frac{(0,5 \times 10^{-4})^2}{0,00018} =$$

$$= \frac{2 \times 0,25 \times 10^{-8}}{9 \times 0,00018}, \quad \frac{V_0}{L} = \frac{120 \times 44,7}{0,02},$$

$$P = \frac{2 \times 0,25 \times 10^{-8} \times 120 \times 44,7}{9 \times 0,00018 \times 0,02} = 0,82.$$

Эта величина P относится к частице диаметром 1 мкм и плотностью 1. Для рудной частицы таких же размеров плотностью, допустим, 5, величина P составит 4,1. Для такого значения P величина E по кривой Дейвиса [1] будет равна 50%. Для цилиндра того же диаметра и частицы той же плотности, но диаметром 5 мкм величина P равна 19,6 и E соответственно составит 80%.

Из приведенных выше цифр можно видеть, что тонкие трубчатые коллекторы должны в некоторой степени селективно извлекать относительно крупные частицы.

По сравнению с тонкими полимерными трубками все остальные типы коллекторов менее пригодны для отбора проб аэрозолей из быстродвигающихся крупных масс воздуха. Механические (ударные), электростатические и термические коллекторы, центрифуги и мембранные фильтры эффективны лишь при опробовании воздушных потоков, двигающихся с малой скоростью, и позволяют опробовать только небольшие объемы воздуха.

При правильном опробовании скорости движения воздуха в коллекторе и в главном воздушном потоке должны быть одинаковыми. Такого рода опробование называется изокINETическим. Если инерция и предельная скорость частиц не слишком малы, то количество захваченных частиц аэрозоля будет зависеть от скорости опробования и угла атаки входного отверстия коллектора по отношению к направлению потока воздуха. Рассматриваемые здесь коллекторы всегда ориентируются по потоку воздуха, скорость движения которого соответствует скорости полета самолета и остается примерно одинаковой в серии рейсов. Поскольку скорость ветра на небольшой высоте ничтожна сравнительно со скоростью движения самолета, количество захватываемого аэрозоля остается относительно постоянным. Влияние ветра еще уменьшается тем обстоятельством, что обычно воздушное опробование производится при хорошей погоде в благоприятных метеорологических условиях.

Еще одно важное достоинство тонкотрубчатых коллекторов заключается в том, что большее их количество можно смонтировать на спе-

циальной раме, подвешиваемой к самолету и располагающейся ниже его на высоте 200—300 футов от земной поверхности.

Для микроанализа аэрозолей и определения размеров частиц в них захваченный при опробовании материал извлекается из коллекторов и концентрируется, что производится обыкновенной их механической очисткой.

МЕТОДИКА ВЕЙССА

В основе методики Вейсса лежит открытие факта присутствия в воздухе мельчайших частиц обнажающихся на земной поверхности минерализованных горных пород и почв. Эти частицы образуют так называемые аэрозоли, в которых при использовании особо чувствительных методов анализа удается определить различные рудные элементы и соответственно природу материнских для аэрозолей месторождений. Таким образом, в общем методика заключается в воздушном отборе частиц минералов и анализе таких частиц с целью определения присутствия в них полезных компонентов. Эта методика может быть весьма эффективной.

Методика Вейсса позволяет не только констатировать присутствие в изучаемом районе определенных элементов, но и определять местоположение месторождений. Для этого необходимо, помимо содержания элементов, определять в воздушных пробах количество частиц, содержащих интересующие нас элементы и распределение их по размеру. Поскольку наиболее крупные частицы, отделившиеся от рудных выходов, концентрируются непосредственно над месторождениями, после внесения поправок на скорость и направление ветра максимум содержания крупных частиц будет непосредственно указывать расположение минерализованного участка.

Положение самолета фиксируется фотокамерой и радарной установкой; эти пространственные данные увязываются с распределением минерализованных частиц. Для полных аэрогеохимических поисков в изучаемом районе необходимо произвести серию полетов по определенной системе.

На первых этапах развития метода химические анализы производились на электронном микронзонде. Как известно, действие этого прибора основано на анализе рентгеновского излучения, возбуждаемого на поверхности исследуемого образца пучком электронов, сфокусированным в пределах площади диаметром менее 1 мкм. Такое электронное опробование может быть или статичным и направленным

в одну интересующую точку, или площадным, выполняющимся посредством сканирования в пределах участка до 0,5 мм².

Наиболее важная особенность метода электронного микрозондирования — возможность сканирования, позволяющая наблюдать на рентгеновском изображении распределение отдельных элементов в пределах исследуемой области от точки к точке с увеличением от 250 до 3000. Это дает возможность непрерывно и непосредственно сопоставлять рентгеновскую картину распределения элементов с электронным изображением объекта.

Рентгеновская картина дает полуколичественную информацию о распределении конкретных элементов в микроструктуре сканируемой поверхности, а электронное изображение помогает определить природу сканируемой области.

Вслед за качественным определением интересующих элементов в отдельных частицах часто необходима количественная оценка содержания металлов.

Измеряются также размеры рудных частиц. И данные по количеству и размерам частиц в каждом коллекторе систематизируются, а затем используются для построения профилей и изолиний распределения.

Первые опытные съемки были произведены в сухой сезон 1960 г. с 17 по 21 марта в следующих местах:

меднорудный район Окип, Намакваленд; свинцовое месторождение Хохварт, Юго-Западная Африка;

зброшенный медный рудник Хан, Юго-Западная Африка;

оловянный рудник Уис, Юго-Западная Африка.

В период проведения аэропоисков эксплуатационные работы производились лишь на рудниках Окип и Уис. Месторождение Хохварт, представляющее собой обширное рудное поле с довольно бедным свинцовым оруденением, лишь оконтурено буровыми скважинами. Рудник Хан был заброшен в течение 50 лет, и обнажающиеся здесь породы покрыты толстой коркой окислов железа.

Важно подчеркнуть, что все опытные полеты проводились на высоте около 500 футов при безветренной погоде, но в условиях сильных термических конвекционных течений.

Вторая серия полетов была проведена 29—30 августа 1960 г. Это время выбрано в связи с тем, что оно приходится на сухой ветренный сезон в Трансваале. Подвергнутые поискам участки располагались на удалении от действующих рудников, тогда как по данным геологического картирования и бурения в них были

Т а б л и ц а I

Главные результаты аэрогеохимических поисков рудной минерализации

Район	Характер известного оруденения	Открытые элементы
Окип	Медь	Много меди и железа; мало никеля, цинка и мышьяка
Хохварт	Свинец	Много свинца
Хан	Медь	Много железа; мало меди
Уис	Олово	Никаких повышенных содержаний
Бошоек-Коппи Платиновый горизонт Бушвелда	Платина	Никель и медь в ассоциации с платиной; одна платина не выявлялась
Бушвелдский комплекс	Объект пропущен при полете	Железо из Бушвелдского комплекса
Лоскоп район I	Медь	Медь; немного кобальта и цинка
Лоскоп район II	Кобальт и медь	Один кобальт

известны участки с рудной минерализацией. Отбор проб аэрозолей производился на высоте порядка 500 футов. Для этих опытных полетов были выбраны следующие места:

низкогорье в области развития Бушвелдского комплекса севернее никелевых трубок месторождения Влакфонтейн;

медно-кобальтовый рудоносный район Лоскоп-I;

медно-кобальтовый рудоносный район Лоскоп-II;

район выходов платиноносного горизонта Бушвелдского комплекса в пределах территории фермы Бошоек-Коппи.

В табл. I кратко суммированы результаты опытных аэропоисковых полетов. Во всех случаях пробы аэрозолей отбирались на мембранных фильтрах, сквозь которые прокачивался воздух.

Воздух поступал через алюминиевый растроб диаметром 5 дюймов, выдвинутый вперед из кабины четырехмоторного самолета марки Герон. В этом самолете пропеллеры расположены позади кабины и не оказывают влияния на поток воздуха, поступающий в коллектор.

Опытные аэропоисковые работы полностью подтвердили правильность принципов новой методики, однако сразу стало очевидным, что обнаружение частиц размером в несколько

микрон на мембранных фильтрах диаметром 10 см посредством пучка электронов диаметром 1 мкм подобно «взгляду из бесконечно малого в бесконечно большое». Принятая методика была вполне применима, но работы обходились слишком дорого. Эти трудности усиливались малочисленностью рудных частиц, захватываемых мембранными фильтрами. Проницаемость таких фильтров невелика и даже при оптимальном для них режиме работы насоса объем опробованного воздуха остается небольшим. В связи с этим были предприняты попытки концентрации частиц аэрозолей с входной площади фильтра на диск диаметром 1 мм. Эта процедура заключалась в растворении фильтров в ацетоне, центрифугировании полученного раствора и фильтровании его посредством вакуумного отсасывания через мелкие фильтры диаметром 1 мм. Однако было установлено, что ацетон растворяет не только фильтры, но и рудные частицы микронных размеров. Проверен был также и нейтронно-активационный анализ, однако оказалось, что он слишком длителен и громоздок.

Вслед за упомянутыми экспериментами в течение нескольких лет продолжались поисковые исследования различного рода, пока в конечном счете не было найдено решение вопроса с использованием синтетических полимерных трубчатых коллекторов. Выше уже рассматривались теоретические основания их использования в аэрогеохимических поисках.

Такие коллекторы состоят из квадратных рам со стороной 30 см, выточенных из алюминиевой трубки диаметром 10 мм. На раму наматывается 450 витков (900 футов нейлоновой нити диаметром 0,10—0,16 мм). Рамки соединяются таким образом, что с фронтальной и задней стороны они образуют две серии трубок длиной 30 см. Зазор между смежными трубками 0,5 мм, а зазор между их сериями — 10 мм (т. е. равен диаметру алюминиевой трубки). В связи с обмоткой выходы трубок на задней стороне рамок располагаются посередине между их входными отверстиями на передней стороне рамок. Большое количество таких рамок обматывается нейлоновыми трубками в лаборатории на чистом воздухе и упаковывается в отдельные пластмассовые пакеты. Две нейлоновые линии протяженностью 220 м с прочностью на растяжение 80 кг, намотанные в противоположных направлениях на два алюминиевых барабана и закрепленных на одной оси, служат подъемным устройством, приводимым в движение электромотором мощностью 0,5 л. с. Источником тока могут служить или генератор самолета, или батареи. На одной

стороне рамы закрепляется балласт весом 3 кг, предотвращающий ее вращение. Рама подвешивается на буксирной линии на четырех нейлоновых лесках, закрепленных в углах рамы. Регулировкой этих четырех нейлоновых лесок можно контролировать смещение коллектора в боковом и нижнем направлении.

После такого оборудования установка становится пригодной для непрерывного автоматического опробования, в то время как один барабан опускает одну линию, одновременно другим барабаном поднимается вторая линия. Таким образом, каждый из двух коллекторов проходит вверх половину пути другого коллектора.

Для вращения установки необходимо приложить лишь небольшое усилие. Поскольку поток воздуха обуславливает опускание рамы, ее сопротивление будет помогать мотору поворачивать вверх уже опустившийся второй коллектор. Опускание и подъем коллекторов происходит за 31 с.

После экспозиции коллекторы помещаются в новые чистые пластмассовые пакеты и нумеруются в соответствии с их положением в момент опробования по отношению к земной поверхности. Пространственные позиции коллекторов в период опробования определяются с использованием аэрофотокамеры и соотносятся своими номерами с картами аэросъемки. Для точной ориентировки можно использовать также радарные установки Допплера.

Рамы передаются в спектрографическую лабораторию. Здесь нейлоновые трубки испепеляются при низкой температуре. Нейлоновый материал полностью улетучивается и остается небольшой концентрат, содержащий рудоносные частички. Этот концентрат прокаливается в спектрографе и определяются относительные количества металлических элементов.

Важное преимущество только что охарактеризованной методики заключается в том, что тонкотрубчатые коллекторы, опущенные до высоты 100 м от земной поверхности, захватывают аэрозоли в количествах, достаточных для спектрального анализа (быстрой и дешевой методики). Тогда как ранее необходимы были очень большие затраты времени для исследования кусочков мембранных фильтров с целью выявления минерализованных частиц, спектральный анализ в течение минут позволяет прямо определять относительные содержания металлов.

Рассмотренная выше методика позволяет выявлять выходы рудной минерализации с определением характера оруденения и установлением их пространственного положения с точностью, допустим, порядка 1 кв. мили в пре-

делах площади в десятки тысяч квадратных миль.

Для более точного определения местоположения рудных выходов частицы аэрозоля необходимо удалить из нейлоновых коллекторов и получить из них концентрат для определения размеров на электронном микрозонде. Эта процедура позволяет строить пространственные кривые распределения частиц по размерам для каждого из металлов порознь. Расположение максимумов таких графиков более точно фиксирует в пространстве рудные выходы.

Важная особенность метода — новый способ извлечения частиц аэрозолей из трубок и их концентрация для дальнейшего анализа. Этот прием основан на протягивании трубок сквозь подложку подходящего материала, обладающего слабой абразивной или смачивающей способностью. Можно, например, использовать плотную нейлоновую подложку размером 1—2 кв. см. Такая подложка складывается вдвое, и трубчатый коллектор помещается внутри складки. Затем прокладка с вложенной в нее трубкой сдавливается, а трубка протягивается, так что из нее выдавливаются содержащиеся в ней частицы аэрозоля, образуя на пленке две тонкие полоски. Полученный таким образом концентрат можно теперь исследовать на электронном микрозонде уже описанным выше способом.

Аэрогеохимические поиски в северной части Капской провинции ЮАР у границы с Юго-Западной Африкой были проведены 28 и 29 марта 1969 г. (фиг. 1). Эта территория, тесно прилегающая к реке Оранжевой, представляет значительный геологический интерес. Здесь известны несколько неразрабатываемых проявлений медного оруденения, а также один старый заброшенный медный рудник. Район расположен в 100—120 милях северо-западнее рудника Окип. На таком расстоянии любое загрязнение воздуха, обусловленное действующим рудником, должно рассеяться до однородного слабого фона.

Площадь одного из участков покрыта профилями опробования 20, 25, 26, 27, 29, 33, 34, 35, 36 и 37 (табл. II). Протяженность профилей колебалась от 8 до 11 миль, и лишь длина профиля 27 составляла 16 миль. Суммарная протяженность линий опробования 130 миль.

Второй участок (табл. III) был выбран с таким расчетом, чтобы в нем отсутствовали проявления медной минерализации, но имелись небольшие выходы других типов оруденения, в том числе вольфрамового. Здесь были выполнены профили опробования 1, 2, 5, 9, 10, 14, 15 и 17. На этом участке проверялось поведение

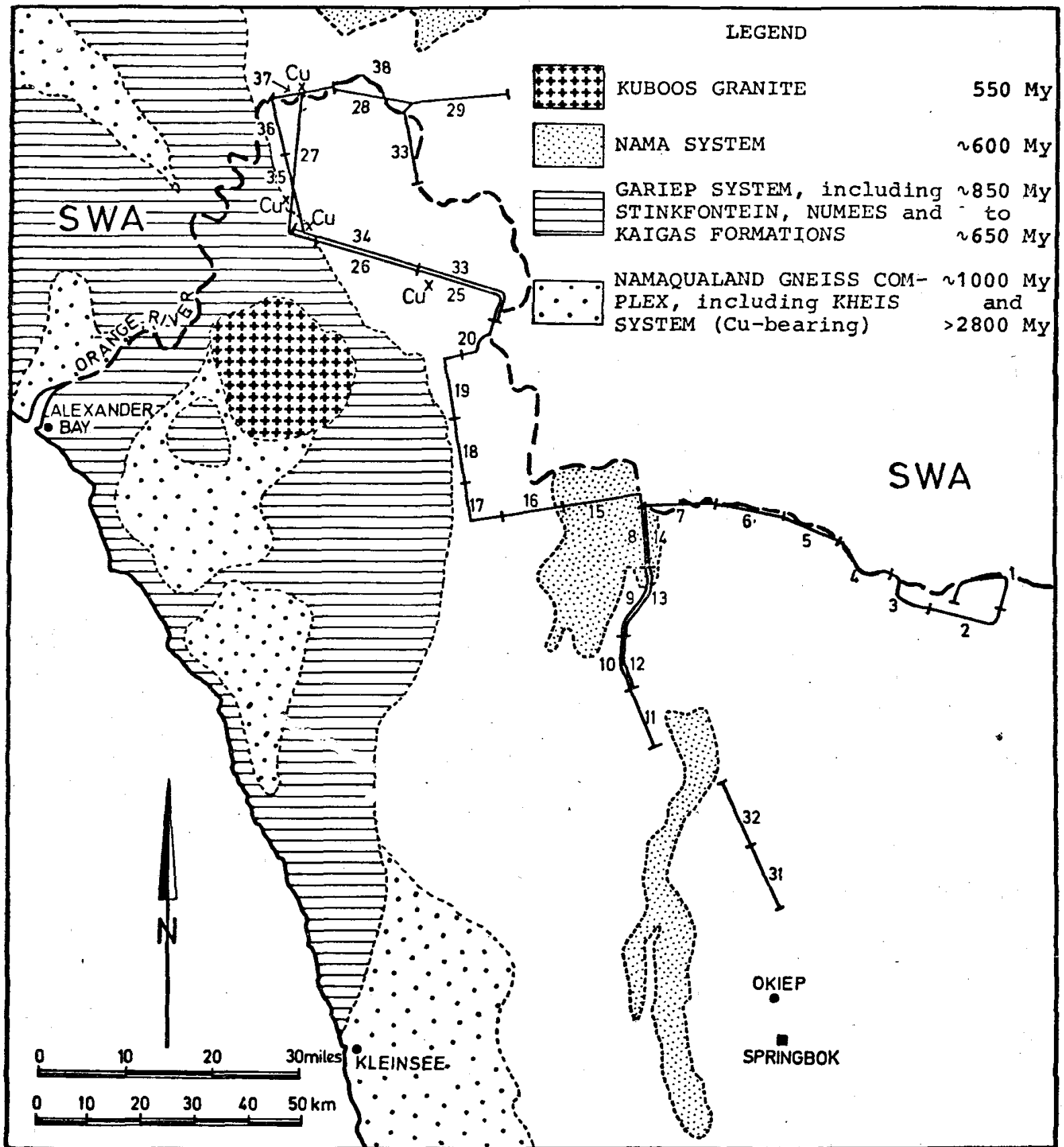
меди, которая должна здесь присутствовать в аэрозолях лишь в виде фона, обусловленного рассеянным содержанием этого металла и загрязняющим влиянием месторождения Окип, расположенного на расстоянии 60—80 миль. Общая протяженность профилей опробования составила здесь около 70 миль.

При выборе этого района было упущено из вида, что оптическим спектрометром не удастся определить вольфрам в связи с малой интенсивностью его спектра. Вместе с тем, загрязнение вольфрамом было установлено методом нейтронной активации в пробах обоих районов на далеких расстояниях друг от друга. Спектральным анализом установлено также повышенное содержание марганца, что подтвердили и данные нейтронно-активационного анализа. Марганец и вольфрам связаны с пегматитами. Специальными анализами установлено отсутствие этих элементов в горючем, используемом самолетом. Свинец встречается в мелких рудных линзах, но он обнаружен также и в горючем. Содержания этого элемента в пробах очень невелики. Удалось, кроме того, установить, что происходило загрязнение воздуха в результате механической абразии различных частей самолета, изготовленных из сплавов (штока, цилиндров, выхлопных трубок), а также электромотора, вентилятора и сит электростатического сепаратора в лаборатории. Генератор самолета и мотор сепаратора загрязняли воздух частицами меди. Источником хрома оказались хромированные сита сепаратора.

В табл. II приведены результаты микроанализа проб из меденосного района, а в табл. III — из вольфрамсодержащего участка. В табл. IV приведены результаты изучения проб аэрозолей, отобранных на большей высоте и частично подвергнутых дополнительным испытаниям. Так, в пробе 21 были испытаны выхлопные газы, а пробы 23 и 24 предназначены для определения загрязнения атмосферы на высоте 7250 футов от земной поверхности за счет рудника Окип, расположенного в 30—40 милях от изучаемых профилей. Аналогичное назначение имели и другие пробы: 31 — на высоте 3000 футов в 10—15 милях от Окипа, 32 — на высоте 6000 футов в 18—27 милях от Окипа и над небольшим рудником Гринбенк.

Точная привязка линий полета не производилась, за исключением случаев, когда имелись легко различимые земные ориентиры, например отвал рудника Нумис, другие распознанные горнорудные объекты, а также реки и горные вершины.

Коллекторы состояли из легких алюминиевых рам размером 12 × 12 дюймов, каждая



ФИГ. 1. Схема маршрутов аэрогеохимических поисков и геологического строения района реки Оранжевой, Капская провинция, ЮАР.

из которых была обмотана нейлоновой нитью длиной 900 футов и диаметром 0,18 мм. Один коллектор свешивался с крыла, а другой из кабины самолета. В то время как один коллектор поднимался, второй одновременно опускался, чем достигалась непрерывность опробования аэрозолей. Коллекторы подвешивались на конце нейлоновых тросов длиной 600 футов и

с прочностью на разрыв 160 фунтов, причем каждый коллектор снабжался балластом весом 5,5 фунта. Это обеспечивало расположение коллекторов на высоте примерно 200 футов ниже самолета.

Усилие сопротивления коллектора с балластом во время полета, измеренное динамометром, варьировало в зависимости от скорости

движения:

Скорость, мили/ч	Усилие, Н
60	70
120	90

Эти определения производились при хорошей погоде с легким изменчивым южным и юго-западным ветром.

В двух случаях тросы оборвались и два коллектора были утеряны. В двух других случаях тросы двух коллекторов перепутались, но коллекторы удалось поднять. Тросы перепутались лишь при разворотах самолета между горными вершинами. Учитывая это обстоятельство, можно отметить замечательную устойчивость в полете коллекторов, несмотря на то что они подвешены на тросах длиной 600 футов и на половине этого расстояния при смене проходят друг от друга всего лишь

в 7 футах. При полетах по прямым линиям потери коллекторов должны быть ничтожны.

В табл. II приведены результаты анализа 10 аэропроб, отобранных над районом с проявлениями медного оруденения. Четыре пробы отобраны непосредственно над известными минерализованными участками. Две пробы взяты над старыми рудниками Нумис и Кодас, помеченными на топографической карте масштаба 1:500 000 и опознанными с самолета. Положение в пространстве третьей пробы довольно неопределенно: это рудопроявление было грубо перенесено с карты полезных ископаемых Южно-Африканского Союза (1959 г.) масштаба 1:2 000 000 на топографический план масштаба 1:500 000.

Месторождение Нумис представлено богатыми рудами. Оно было заброшено в связи с удаленностью и плохими транспортными условиями. В пробе 26А, взятой над этим месторождением, обнаружено необычайно высо-

Таблица II

Результаты анализа проб спектрометрическим и нейтронно-активационным методами

Номер пробы	Спектрометрические определения, млн ⁻¹						Нейтронно-активационные определения, мкг			Примечания
	Cu	Pb	Ni	Mn	Cr	Ti	Cu	W	Mn	
20B	20	2	5	2	2	50	—			См. 33В Отвал рудника Нумис
25А	40	4	20	30	40		0,20	0,7	2,8	
26А	4000	8	10	30	30		3,5	2,4	1,0	
27В	40	2	20	30	30					
29В	40	2	16	30	30					Рудный выход медного месторождения Талус-Пик Рудный выход медного месторождения Кодас
33В	85	10		30	3					
34А	50	8		40	3					
35В	100	20		100	8					
36В	16	2		13	2					
37А	40	8	13	60	20					

Таблица III

Результаты анализа проб в районе реки Оранжевой

Номер пробы	Спектрометрические определения, млн ⁻¹						Нейтронно-активационные определения, мкг			Примечания
	Cu	Pb	Ni	Mn	Cr	Ti	Cu	W	Mn	
1В	40	20		30	5					Каньон реки Оранжевой
3В	60	30		300	5					
5В	85	20		300	3					
9В	30	2	5	400	3					
10А	20	3		300	5					
14А	60	20		300	6					
15В	40	2	5	500	3					
16А	60	5		500	2					
17А	40	10		500	3					

кое содержание меди (4000 млн⁻¹). Проба отбиралась непосредственно над старым рудным отвалом, подвергавшимся интенсивной эрозии.

В пробе 35В над месторождением Кодас и в пробе 33В над районом Талус-Пик содержание меди составляет 100 млн⁻¹, т. е. вдвое больше фона, наблюдающегося в остальных семи пробах, среднее значение которого отвечает примерно 40 млн⁻¹. Видимо, это и есть региональный фон, в который входят, кроме того, загрязнения из всех остальных источников в материалах и при обработке и анализировании образцов.

Необходимо отметить, что спектрометром открываются только следующие элементы со следующими нижними пределами чувствительности (в млн⁻¹):

Pb = 2, Sn = 5, Ga = 2, Bi = 5, V = 5, Mo = 2,

Таблица IV

Результаты анализа специальных (методических) проб

Номер пробы	Спектрометрические определения, млн ⁻¹						Нейтронно-активационные определения, мкг			Примечания
	Cu	Pb	Ni	Mn	Cr	Ti	Cu	W	Mn	
3А							0,13	0,60	1,00	Выхлопные газы (5 мин) Выхлопные газы (5 мин)
21В	70	2	5	600	4					
22А							0,60	3,00	20	
23В	70	20	13	40	40	50				
24В	40	4	5	40	5		0,14		0,50	
31В	40	3	5	13	4					
32А	85	8		16	3					Меднорудный выход близ Гринбенка
СТВ1	30	5		130	4					
СТВ2	20	5		100	4					

Cu = 2, Zn = 100, Ti = 50, Ag = 0,2, Co = 5,
Ni = 5, Mn = 2, Cr = 2.

Интересно сравнить результаты спектрального и нейтронно-активационного анализа проб 25А и 26А. По данным определения спектрометром содержание меди в пробе 26А в сто раз больше, чем в пробе 25А, тогда как нейтронно-активационные определения дают лишь семидесятикратную разницу содержаний. Это расхождение проливает свет на ту роль, которую играют электростатические силы в задерживании частиц аэрозолей в нейлоновых трубках. При активационном определении эти трубки помещались в пластмассовый контейнер, который затем вводился в радиоактивную установку; нейтрализация электростатического заряда нейлона при бомбардировке нейтронами и последующая вибрация контейнера и нейлоновых трубок приводили к отделению частиц от нейлона. При удалении трубок из облученного контейнера значительная часть захваченных частиц аэрозолей утрачивалась к моменту определения. Возможный порядок такой потери определяется отношением 100:17.

Необходимо отметить, что пробы 25А и 33В значатся как относящиеся к району Талус-Пик, но, очевидно, при взятии пробы 25А объект был пропущен.

В табл. III приведены результаты опробования второго района, в пределах которого на карте полезных ископаемых Южно-Африканского Союза (1959 г.) не показано проявлений медной минерализации. Вместе с тем в этом районе показано очень большое количество выходов с минерализацией W, Be, Li, Mo, Pb и т. д. Район расположен ближе к месторождению Окип (в 60—80 милях), чем пло-

щадь, данные опробования которой приведены в табл. II (в 100—120 милях от Окипа). Величина среднего арифметического фона по восьми пробам составляет 44 млн⁻¹, однако средневзвешенное значение несколько выше. В пробе 58 содержание меди составляет 85 млн⁻¹. Это единственная слабая положительная аномалия меди в девяти пробах, соответствующих примерно 70 линейным милям полета. Весьма вероятно, что в этом случае зафиксировано проявление медной минерализации. Проба с повышенным содержанием меди отобрана при полете в каньоне реки Оранжевой, где на отмелях обнажаются породы, прикрытые в других участках мощными наносами. Этот пример свидетельствует о возможной эффективности аэрогеохимических поисков в такой обстановке, в которой опробование поверхностной почвы будет бесполезным.

В табл. IV приведены данные по отдельным пробам.

Для пробы 3А (табл. III) имеются лишь результаты нейтронно-активационного анализа, но отсутствуют данные спектрометрии. Эти цифры в сопоставлении с данными по пробе 25А в табл. I приняты как соответствующие фоновому содержанию меди в районах отсутствия рудных выходов этого металла. Пробы 21В и 22А — результаты анализа выхлопных газов самолета. Проба 22А была подвергнута только нейтронно-активационному анализу. В выхлопных газах установлено содержание меди в 4,5 раза больше, а содержание вольфрама в 5 раз больше, чем в пробе 3А. Вместе с тем содержание марганца в тех же сопоставляемых пробах больше даже в 12 раз. В пробе 21В содержание меди составило 70 млн⁻¹, а марганца — даже 500 млн⁻¹. Это свидетельствует о том, что продолжительное поступление

выхлопных газов в коллектор может приводить к завышению содержания меди в пробах. Практически же коллекторы отчасти доступны для выхлопных газов лишь в течение немногих секунд в момент их втаскивания в кабину самолета.

Пробы 21В и 24В были отобраны на высоте 7250 футов от земной поверхности, но лишь на расстоянии 30—35 миль от Окипа. В пробе 23В обнаружилось $70 \text{ млн}^{-1} \text{ Cu}$ и $20 \text{ млн}^{-1} \text{ Pb}$. Такие величины выше обычного фонового содержания этих элементов. Однако в пробе 24В содержания меди и свинца оказались небольшими, при этом спектральные определения меди подтвердились нейтронно-активационными. Видимо, такая неоднородность распределения металлов в аэрозолях как раз и связана с близостью Окипа, с неравномерными потоками металлургических дымов на высоте 7250 футов.

Пробы 31В и 32В отобраны на высоте 3000 футов. В пробе 31В, взятой всего лишь в 15 милях от Окипа, обнаружилось обычное фоновое содержание меди, свинца, марганца и хрома. С другой стороны, в пробе 32А, отобранной в 25 милях от Окипа и над эксплуатирующимся рудником Гринбенк оказалось аномально высокое содержание меди (85 млн^{-1}).

Таким образом, из пяти проб последней группы в двух обнаружались аномально высокие содержания меди — в одном случае (32А) над известным рудопроявлением, тогда как во втором случае повышенное (70 млн^{-1}) ее количество не находит исчерпывающего объяснения.

Опробование выхлопных газов самолета показало, что продолжительная (порядка 5 мин) экспозиция коллекторов в таком случае может привести к загрязнению пробы медью. Следует предохранять коллекторы от выхлопных газов, когда они близко расположены около самолета.

Как уже говорилось, во всех ранее описанных случаях нейлоновые трубки с их содержимым испекались, а получающийся остаток сжигался в спектрографе. Не исключено, что при прямом обугливания заметные количества аэрозоля могли утрачиваться. С целью проверки этого предположения четыре пробы параллельно анализировались с предварительным испекаением и растворением нейлоновых нитей в серной кислоте и с последующим восстановлением при 600°C в буферной печи. В остаток вводились присадки весом 20 мкг. Вес нейлоновых трубок в среднем составляет 5 г. Нейтронно-активационный анализ показал, что содержание отдельных элементов в пробе состав-

Таблица V

№№ пп.	Pb	Sn	Cu	Ni	Co	Mn	Cr	Место взятия пробы
4А ¹	2		85	60	13	600	16	Каньон реки Оранжевой
4ВХ ²	2		130	50	30	850	20	
12А	13		50	5		600	8	Копи Джоффе
12ВХ	13		300	5		1000	10	Копи Джоффе
13А	16		85	5		500	13	
13ВХ	20		130	10		1000	13	Река Козис
19А	20		60	8		850	20	
19ВХ	16		130	6		1300	30	Долины рек Бок и Энкемс
5А	13		60	5		500	10	Река Козис
8В	13		130	10		600	8	
10В	13		100	13		400	10	Южнее копей Джоффе
22В	13		85	10		500	8	Выхлопные газы (5 мин)

¹ Для проб с буквой А предварительная обработка серной кислотой не проводилась.

² Пробы, помеченные буквам и ВХ, предварительно обрабатывались серной кислотой.

ляет для фоновых количеств около 0,2 мкг, а для положительных аномалий 2—3 мкг.

В табл. V приведены анализы проб 4, 12, 13 и 19, произведенные по обоим принятым методам. Можно видеть, что при анализировании с применением серной кислоты содержания меди оказались значительно выше во всех случаях. Это позволяет полагать, что в процессе прямого испекаения нейлоновых трубок действительно происходит потеря минеральных частиц. Дальнейшие работы полностью подтвердили этот вывод.

Места взятия обсуждаемых проб указаны в табл. V. На приводимой здесь мелкомасштабной карте их точно указать невозможно, но они легко привязываются на листах топографических карт масштаба 1:500 000 районов Спрингбок, Апингтон и Александер-Бей.

Вслед за охарактеризованными выше работами были проведены предварительные исследования с целью подготовки к поискам на площади 10 400 кв. миль. Для этого 15 и 17 января 1970 г. в пяти различных участках было проведено опробование по профилям общей протяженностью 700 миль. Отчеты о результатах анализа проб были закончены Национальным металлургическим институтом к 10 и 31 марта 1970 г. (см. табл. VI).

В первом отчете приводятся данные анализов проб 1—6, отобранных на высоте 750 футов от земной поверхности над недавно открытыми месторождениями близ Приски. На фиг. 2 показаны места взятия этих проб в районе Приска — Апингтон. Содержания Co, Mg, Cr, Sn

Таблица VI

Результаты анализа проб из нескольких районов Южной Африки

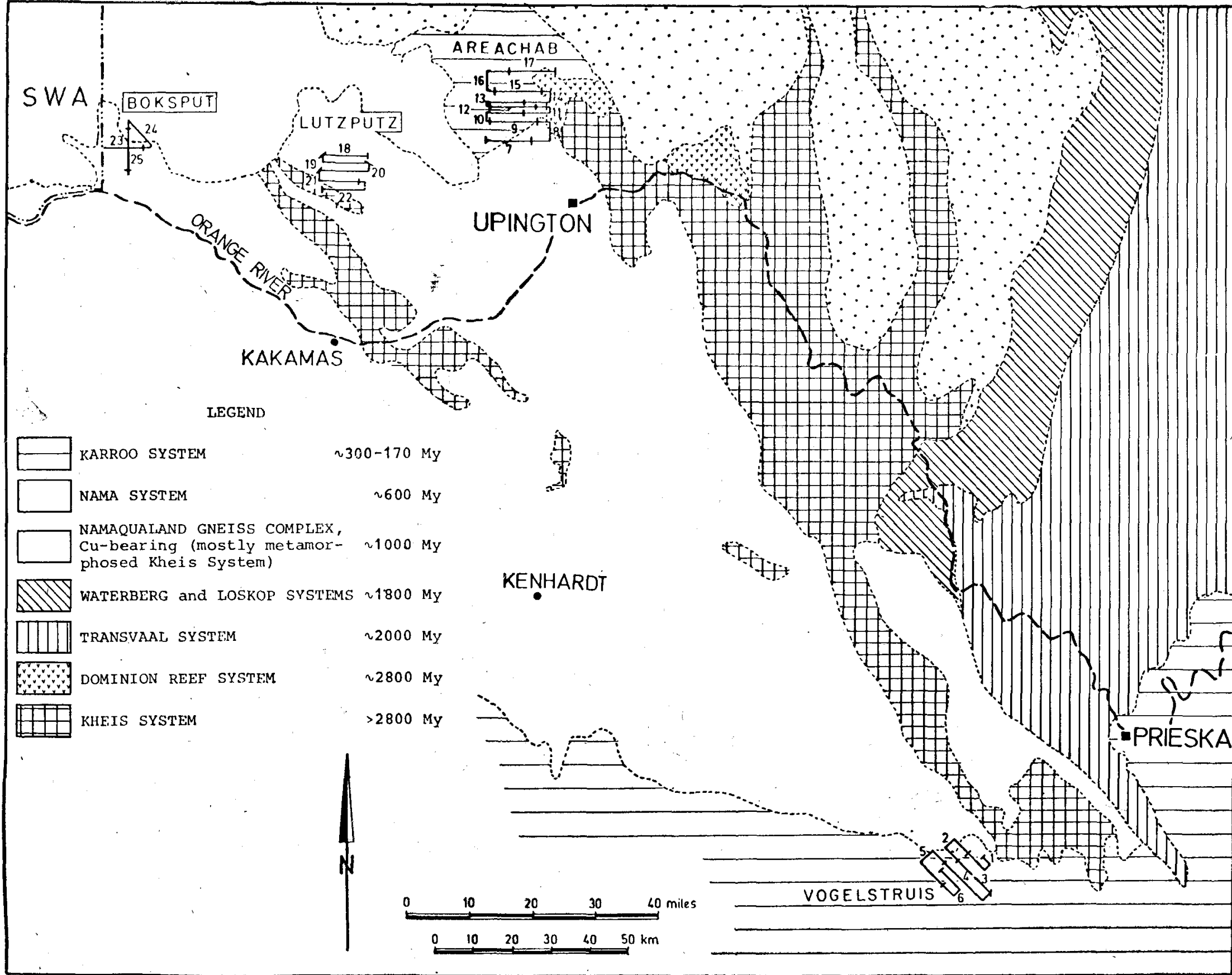
Номер образца	Co	Mn	Pb	Cr	Sn	Ni	Mo	Hg	Zn	Cu
1	<3	17	13	9	11	10	6	<10	<30	30
2	<3	60	140	31	11	13	7	<10	<30	45
3	<3	58	27	9	14	13	9	<10	<30	45
4	<3	40	20	25	14	15	<3	<10	<30	45
5	<3	29	10	20	9	6	8	<10	<30	30
6	<3	9	<3	12	<3	<3	<3	<10	<30	<3
7	<3	14	<3	<3	<3	11	<3	<10	<30	<25
8	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<10	<30	<25
9	5	11	7	<3	<3	11	<3	30	<30	<29
10	4	6	3	<3	<3	3	<3	<10	<30	8
11	4	3	3	<3	<3	3	<3	<10	<30	3
12	5	9	5	19	<3	4	<3	<10	<30	4
13	3	62	37	16	12	11	<3	<10	<30	64
14	<3	80	<3	<3	<3	<3	<3	<10	<30	9
15	8	14	17	11	<3	10	<3	<10	<30	17
16	4	11	5	13	<3	11	<3	<10	<30	28
17	7	11	4	<3	<3	5	<3	<10	<30	50
18	<3	100	20	21	11	29	<3	<10	<30	48
19	7	44	20	9	7	12	<3	15	<30	24
20	4	21	<3	<3	<3	8	<3	<10	<30	7
21	9	26	23	<3	<3	10	<3	22	<30	26
22	9	29	5	<3	<3	10	<3	12	<30	24
23	<3	16	<3	<3	<3	9	<3	<10	<30	8
24	<3	7	<3	<3	<3	6	<3	<10	<30	5
25	<3	78	12	33	5	12	<3	<10	<30	35
26	<3	9	5	50	22	44	<3	<10	<30	5
27	4	11	<3	73	20	30	<3	<10	<30	5
28	11	45	23	190	47	24	<3	<10	<30	16
29	13	63	15	110	120	40	<3	16	<30	21
30	11	34	28	88	19	23	<3	<10	<30	16
31	7	39	9	33	9	14	<3	<10	<30	19
32	13	46	29	42	6	22	<3	20	<30	22
33	9	47	15	36	7	14	<3	<10	<30	21
34	6	48	8	110	7	14	<3	<10	<30	20
35	12	43	9	33	9	17	<3	<10	<30	20
36	<3	13	<3	37	10	12	<3	<10	<30	4
37	<3	3	<3	<3	<3	<3	<3	<10	<30	<3
38	<3	7	<3	<3	<3	<3	<3	<10	<30	9
39	<3	<3	<3	<3	<3	3	<3	<10	<30	9
41	3	10	3	14	3	17	<3	<10	<30	18
42	12	35	18	26	6	12	<3	<10	<30	25
43	12	28	12	33	8	18	<3	<10	<30	21
44	10	19	4	9	3	6	<3	<10	<30	7
45	8	15	5	<3	<3	5	<3	<10	<30	5
46	13	20	4	<3	<3	7	<3	<10	<30	19
47	14	28	<3	29	6	90	<3	<10	<30	9
48	8	12	<3	<3	<3	<3	<3	<10	<30	3
50	10	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<10	<30	3
51	15	17	<3	<3	<3	<3	<3	<10	<30	6
52	18	17	<3	<3	<3	<3	<3	<10	<30	6
53	13	22	<3	<3	<3	<3	<3	<10	<30	7
54	15	21	<3	<3	<3	10	<3	<10	<30	10
55	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<10	<30	3
56	<3	82	51	300	30	15	<3	<10	<30	60
57	<3	<3	<3	<3	9	<3	<3	<10	<30	<3
58	<3	19	<3	100	6	300	<3	<10	<30	<3
59	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<10	<30	<3
61	<3	6	<3	<3	<3	<3	<3	<10	<30	4
62	<3	150	8	230	36	13	<3	<10	<30	80
63	<3	45	9	40	14	24	<3	<10	<30	20
64	<3	32	<3	16	8	15	<3	<10	<30	54

Продолжение табл. VI

Номер образца	Co	Mn	Pb	Cr	Sn	Ni	Mo	Hg	Zn	Cu
65	<3	10	4	<3	<3	4	<3	10	<30	4
66	<3	11	5	<3	<3	4	<3	10	<30	5
67	<3	19	5	<3	<3	6	<3	10	<30	7
68	<3	22	4	<3	<3	11	<3	10	<30	16
69	<3	14	4	<3	<3	6	<3	10	<30	14
70	4	4	<3	<3	<3	<3	<3	10	<30	3
71	<3	18	4	22	<3	27	<3	10	<30	26
72	<3	7	<3	14	<3	11	<3	10	<30	5
73	<3	8	<3	15	<3	20	<3	10	<30	12
74	<3	4	<3	<3	6	<3	<3	10	<30	<3
75	4	8	<3	<3	<3	7	<3	10	<30	8
76	<3	18	<3	37	48	28	<3	10	<30	14
77	<3	8	<3	4	<3	<3	<3	10	<30	30
78	<3	5	<3	<3	<3	<3	<3	10	<30	30
79	11	27	<3	<3	10	9	<3	10	<30	<3
80	<3	<12	<3	<3	<3	300	<3	10	<30	9
81	6	22	<3	31	<3	<3	<3	10	<30	18
82	6	5	<3	<3	<3	170	<3	10	<30	33
83	10	21	4	10	<3	16	<3	10	<30	5
84	<3	31	13	26	13	13	5	10	<30	19
85	9	7	<3	20	<3	8	<3	160	<30	35
86	5	12	<3	19	3	7	<3	10	<30	12
87	4	10	>300	>300	43	<3	<3	10	<30	13
88	<3	4	4	<3	<3	<3	<3	10	<30	17
89	<3	<3	3	<3	<3	<3	<3	10	<30	14
90	<3	12	<5	<3	<3	8	<3	10	<30	<3
91	<3	14	16	<3	<3	7	<3	10	<30	14

и Ni в этих пробах отвечают обычным фоновым количествам этих металлов, за счет частиц поступивших в аэрозоли из отдаленных источников, а также попавших в пробы с выхлопными газами и при переработке проб. Однако содержание меди и молибдена в этих пробах резко повышено. Содержание меди в них выше, чем в большинстве остальных проб. В четырех пробах из пяти одновременно с содержанием меди резко возрастает и содержание молибдена. Таким образом, в данной геологической обстановке медную и сопутствующую ей молибденовую минерализацию можно выявлять непосредственно при аэрогеохимических поисках. Подобная геологическая обстановка существует в районе, протягивающемся от Приски до Ботсваны.

Пробы 7—17 отобраны над районом близ Ареачеп севернее Апингтона. Результаты микроанализа этих проб приведены во втором отчете, датированном 31 марта 1970 г. В этом районе компанией «Искор» обнаружено месторождение медистого пирита, которое имеет значение лишь как источник пирита, а не меди. В пробах 13 и 17 установлены повышенные содержания меди, а в первой из них — также марганца, который лишь один присутствует



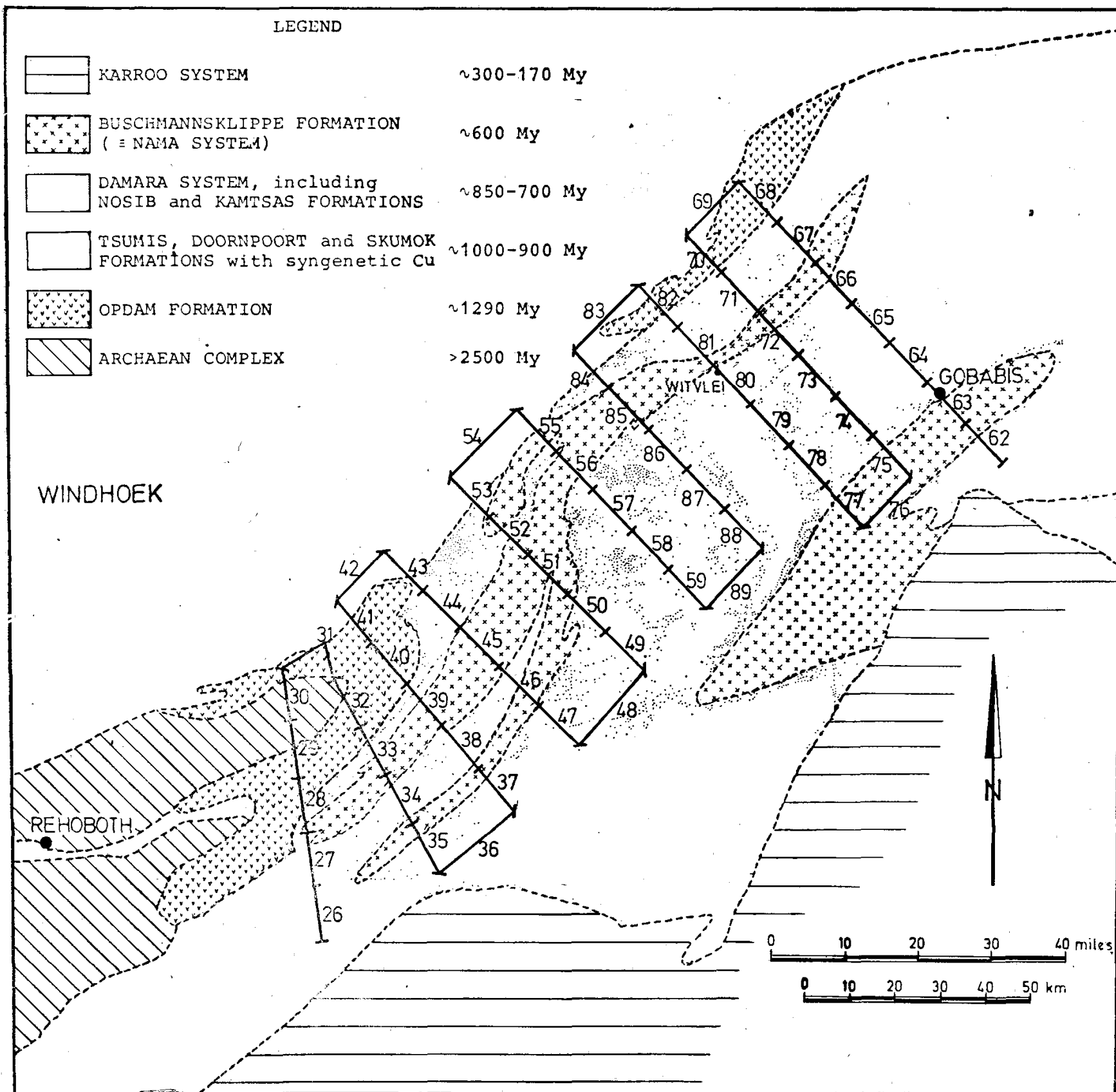
ФИГ. 2. Схема геологического строения района аэрогеохимических поисков в регионе Приска — Апингтон, Капская провинция, ЮАР.
[Система Нама и гнейсовый комплекс Намакваленд автором в легенде не выделены.— Ред.]

в пробе 14. Молибден отсутствует в этом месторождении, и в большинстве проб не обнаруживается устойчивых повышенных содержаний меди. В этом проявляется четкое различие с опробованием района медного месторождения Приска.

Пробы 18—22 отобраны в районе близ Латзпутса, западнее Апингтона. В этом районе известен выход железной шляпы, ниже кото-

рого обнаружена свинцовая минерализация. На государственных картах здесь также показаны проявления меди.

В пробе 18 микроанализом установлены повышенные содержания меди, марганца и свинца, в пробе 19 — марганца, свинца и ртути. Последний элемент присутствует также в пробах 21 и 22. Таким образом, в этом случае мы



ФИГ. 3. Схема геологического строения и аэрогеохимического опробования горнорудного района Гобабис, Юго-Западная Африка.

[Система Дамара и формации Цуми, Дурнпурт и Скумок автором в легенде не выделены.]

сталкиваемся с ореолом рассеяния ртути, который известен для ряда районов мира.

Пробы 23—25 отобраны близ границы ЮАР и Юго-Западной Африки в окрестностях Бокспутса, где, согласно данным монографии «Минеральные ресурсы Южной Африки» (1959), в пегматитах и кварцевых жилах присутствует урановая смолка с высоким содержанием тория.

Сведения о результатах опробования в этом районе не подлежат опубликованию, поэтому можно лишь указать, что в пробе 25 присутствуют значительные количества марганца и меди, а определения в пробах урана и тория показали повышенные их содержания в связи с известными проявлениями, причем в ряде случаев положительные аномалии радиоактивных элементов ассоциировались с ореолами рассеяния ртути.

Выше рассмотрены результаты опробования над районами с известными мелкими рудными телами; исключение составляет лишь медное месторождение Приска.

Следующий рассматриваемый регион — горнорудный район Гобапис, Юго-Западная Африка (фиг. 3). Он имеет длину 115 миль при ширине 40 миль, т. е. площадь его составляет 4650 кв. миль. В этом районе были отобраны пробы 26—89, результаты микроанализа которых представлены в отчете от 10 марта 1970 г.

Северо-западнее деревни Гобапис в районе Витфлей разведаны медные месторождения. Весь этот район опробован аэрометодом Вейсса.

Опробование района производилось в течение 4 летних часов. Поскольку главным объектом изучения была медь, обращалось особое внимание на содержание этого и ассоциирующихся с ним элементов. При первом же взгляде на таблицу результатов опробования обнаруживаются три характерные группы величин.

Первая группа, состоящая из проб 26—35, относится к обширной минерализованной площади восточнее деревни Рехобот.

Во вторую группу входят пробы 56, 71, 79, 80, 84 и 85. Эти пробы относятся к району Витфлей, где, как уже отмечалось выше, открыто крупное медное месторождение.

К третьей группе относятся пробы 62, 63, 64 и 77, отобранные близ деревни Гобапис. На эту площадь, очевидно, протягивается минерализация, развитая в районе Витфлей. В обоих участках медная минерализация имеет первично осадочное происхождение и связана с толщей Цумис, возраст которой составляет 900—1000 млн. лет. Промышленное значение формации Цумис как вмещающей важные медные месторождения установлено в течение последних двух лет.

Изложенные выше результаты аэрогеохимической съемки с опробованием по профилям общей протяженностью 983 мили свидетельствуют о том, что, помимо обнаружения рудных выходов полиметаллов, эта методика позволяет вести поиски ртути и выявлять радиоактивные ореолы.

В этой связи обращают на себя внимание результаты исследований Ф. А. Алексеева [2], применившего аэрометрическую съемку для поисков нефти и газа, а также аналогичная публикация Пирсона. Алексеев показал, что со скоплениями углеводородов связаны аномальные содержания не только урана, радия и тория, но и других металлических ионов, в частности никеля, меди, кобальта, ванадия, марганца, хрома и т. д. Следующая задача, которую собирается решать автор, — разработка методики выявления аномалий этих металлов с целью оконтуривания потенциально-нефтеносных структур.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Aerosol Science*, ed. by C.N. Davies, Academic Press, London, 1966.
2. *Alekseyev F. A., Unconventional Methods in Exploration for Petroleum and Natural Gas*, ed. by W. H. Heroy, Southern Methodist University, Dallas, Texas, 1969.

ВВЕДЕНИЕ

Теннант и Уайт [10] предложили использовать при интерпретации данных геохимических поисков вероятностную бумагу. С тех пор графики кумулятивных кривых широко используются в практике поисковых работ [3, 8, 11]. Вполне вероятно, что существуют некоторые возможности и достоинства графиков частот распределений, которые можно бы исследовать дополнительно.

Теннант и Уайт ссылались на Аренса [1], который показал, что распределение концентраций некоторых элементов в ряде типов пород является логнормальным. Это утверждение, как известно, обсуждалось достаточно подробно. В этой работе логнормальность также принимается как хорошая аппроксимация (не вступающая в дискуссию об истинной природе геохимических распределений).

Согласно Теннанту и Уайту логнормальное распределение по выборке из одной генеральной совокупности, нанесенное на логарифмическую вероятностную бумагу, образует прямую линию. Однако в практике геохимических поисков графики распределений иногда представляют собой кривые линии. Кривизна может

означать появление двух или более распределений, одно относится к фону, а остальные — к аномалиям. Таким образом, работа Теннанта и Уайта приводит к интересному заключению: и фон, и аномалия представляют собой статистические распределения. Другими словами, геохимическая аномалия — скорее целый ряд различных концентраций, нежели концентрации выше некоторого порога. Это положение иллюстрируется фиг. 1. Бимодальная выборка разделена на две мономодальные — фоновую и аномальную соответственно.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФОНА И АНОМАЛИИ

В этой статье предлагается, чтобы фон и аномалия некоторого элемента, распределенного на какой-либо площади, определялись следующим образом:

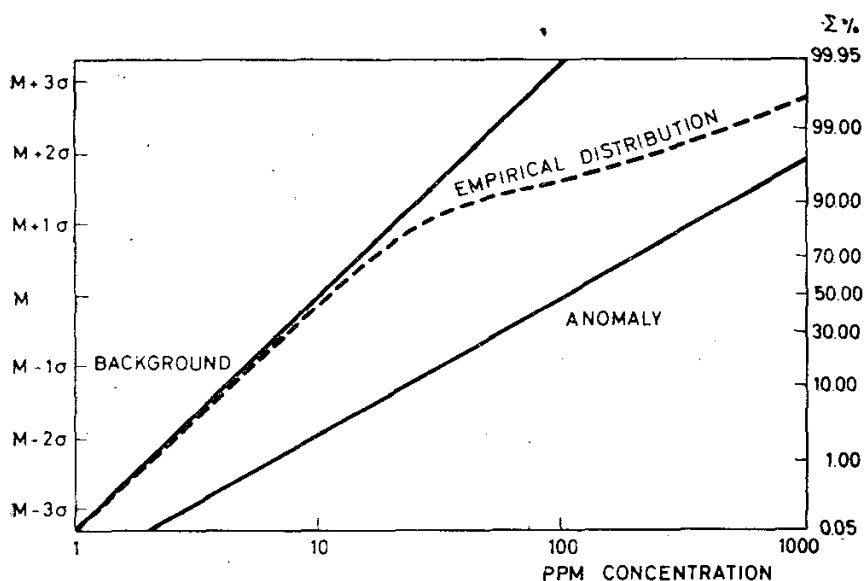
1) фон — это распределение, к которому относится большинство установленных значений содержаний элементов в пробах, отобранных случайным образом по площади;

2) аномалия — это любое распределение, отличное от фона.

В соответствии с приведенными определениями концепция сравнения с порогом теряет смысл, поскольку в фоновую выборку будут включены концентрации выше любых минимально-аномальных содержаний, а аномалии будут включать в себя значения содержаний ниже принятых минимально-аномальных. Принадлежность к аномалии может быть установлена путем проведения соответствующих статистических тестов.

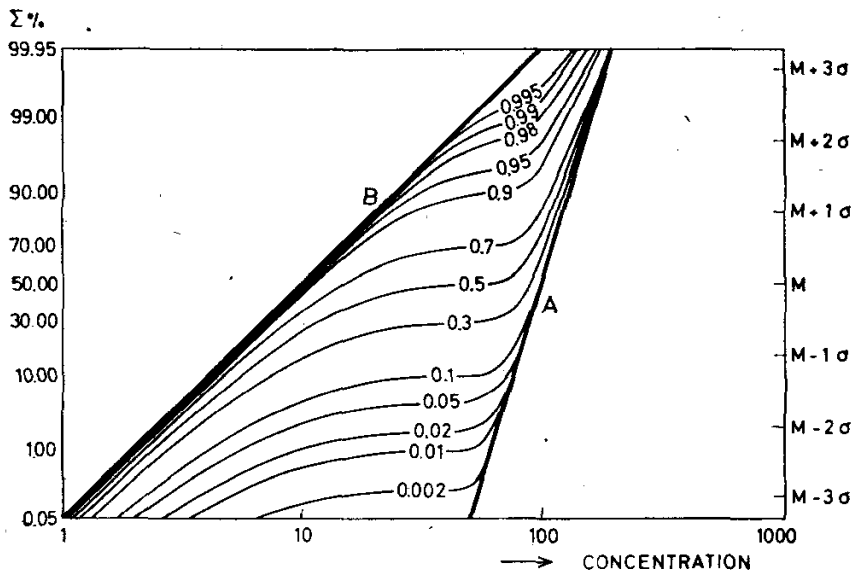
ГРАФИЧЕСКИЙ МЕТОД ОЦЕНКИ ФОНА И АНОМАЛИИ ПО ЭМПИРИЧЕСКИМ ДАННЫМ

Если выборка геохимических данных по площади мономодальна, то легко оценить фон. В этом случае фон просто идентичен эмпирическому распределению и совпадает с аномалией. Это вовсе не означает, что такой результат не представляет интереса с точки зрения по-

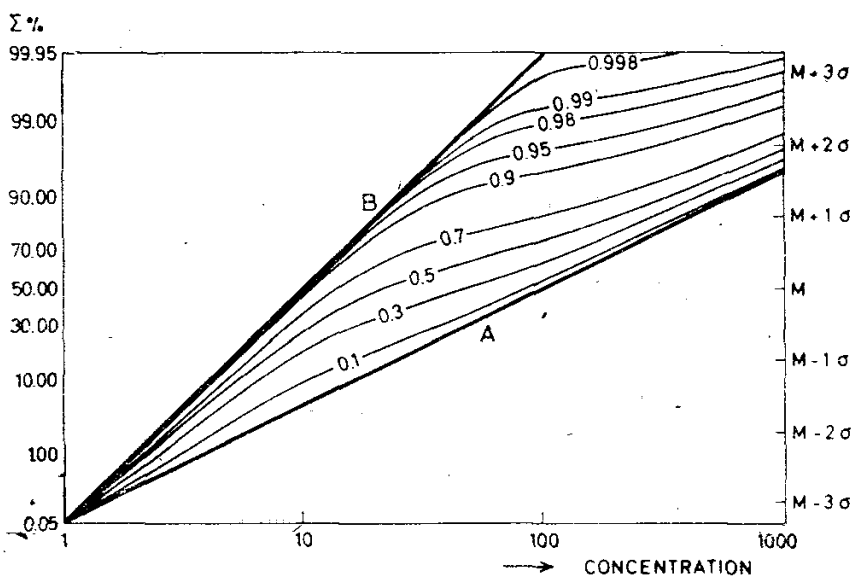


ФИГ. 1. Определение фона и аномалии.

Пунктиром показано эмпирическое распределение, сплошными линиями — фон и аномалии.



ФИГ. 2. Сочетание двух логнормальных распределений.

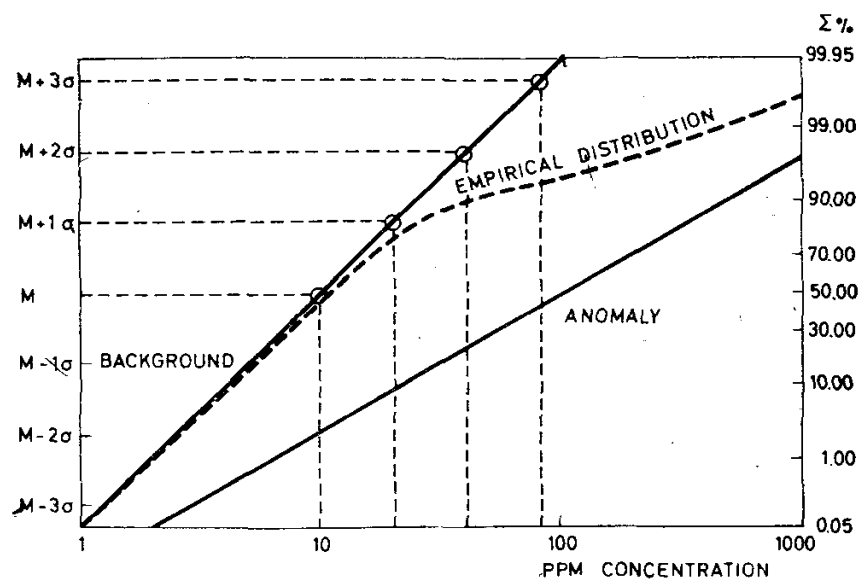


ФИГ. 3. Сочетание двух логнормальных распределений.

исков. Здесь возможны два случая: а) некоторые участки площади, обработанные отдельно, дадут другие распределения или б) вся площадь может рассматриваться как аномалия.

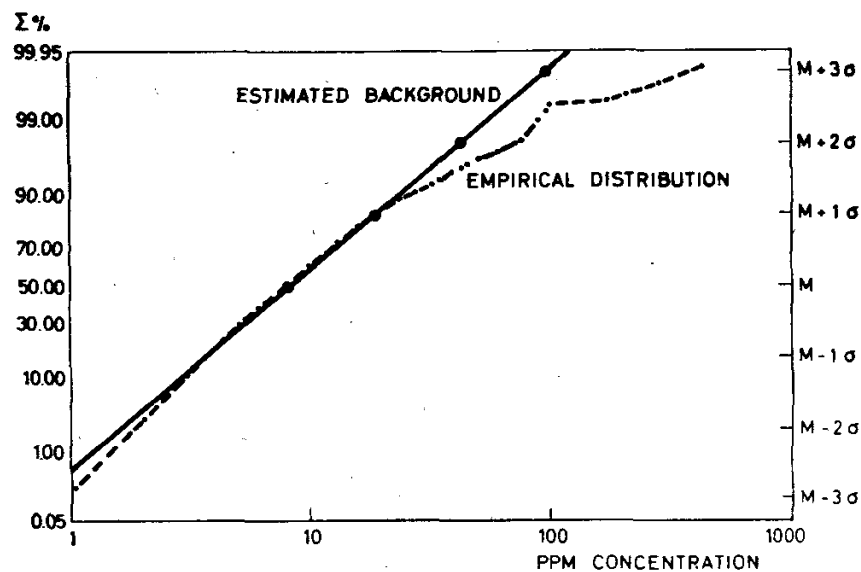
Если выборка геохимических данных по площади полимодальна, проблема определения фона и аномалии совершенно аналогична проблеме разделения выборок из одного распределения. Эта проблема хорошо известна в статистике и имеется несколько методов ее решения [2], причем они обычно включают в себя сложную математическую обработку. Существует, однако, простой графический метод, требующий минимальной математической обработки. Насколько известно автору, этот метод в деталях не описан. Подобная процедура была использована при решении аналогичных проблем в биологии [4, 5, 6].

Предположим, что аномальное распределение А и фоновое распределение В представлено прямыми линиями на кумулятивной бумаге.



ФИГ. 4. Определение минимально-аномального значения по параметрам фона.

Пунктиром показано эмпирическое распределение, сплошными линиями — фон и аномалии.



ФИГ. 5. Медь в донных осадках.

Сплошными линиями показан вычисленный фон, пунктиром — эмпирическое распределение.

Сумму распределений А и В легко вычислить следующим образом.

Если ординаты аномалии, фона и их суммы обозначены Y_a , Y_b и Y_{a+b} соответственно, мы имеем для некоторого значения абсциссы X_1

$$Y_{1(a+b)} = pY_{1(a)} + (1-p)Y_{1(b)},$$

где p — относительный вклад распределения А в смешанную выборку. Если, например, $p = 0,1$, то смешанное распределение состоит из одной части распределения А и девяти частей распределения В. Уравнение принимает вид

$$Y_{1(a+b)} = 0,1Y_{1(a)} + 0,9Y_{1(b)}.$$

Для фиксированного значения p общая бимодальная выборка может быть оценена путем вычисления $Y(a+b)$ для различных значе-

ний X. На основании повторных вычислений для других значений p , может быть построена номограмма на вероятностной бумаге. Два примера таких номограмм показаны на фиг. 2 и 3. Эти номограммы могут быть использованы следующим образом.

1. Кумулятивная кривая эмпирической выборки строится на вероятностной бумаге.

2. Из атласа номограмм выбирается предварительно вычисленная комбинация распределений, которая лучше всего совпадает с эмпирической выборкой.

3. Фон и аномалия оцениваются как два собственных распределения номограммы. Номограмма также указывает относительные вклады фона и аномалии в смешанное распределение.

Параметры, найденные графическим решением, могут быть использованы как входные данные в программу ЭВМ [9].

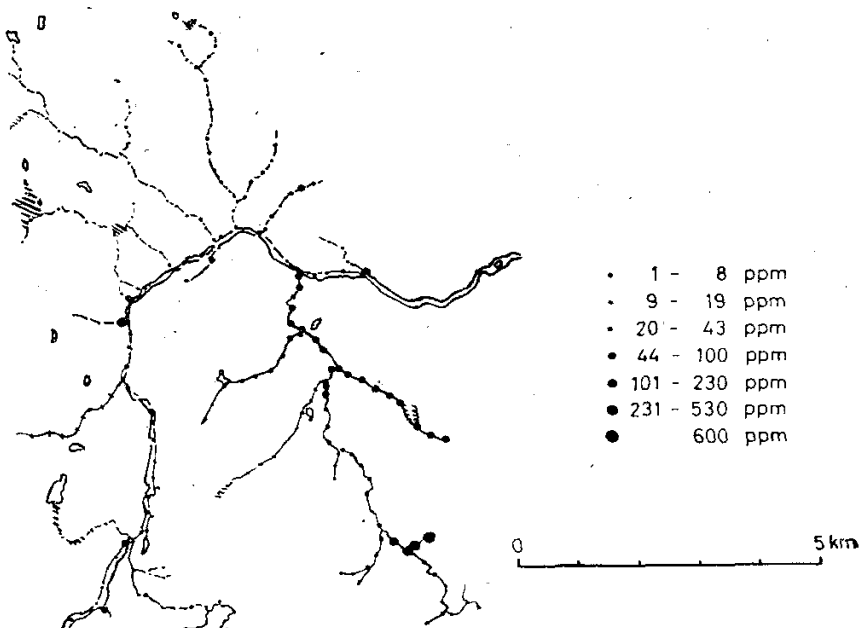
В Геологической службе Норвегии приготовлены номограммы некоторых бимодальных распределений. В принципе полимодальные распределения могут быть обработаны таким же образом, но для них процесс все более усложняется.

ПРИМЕРЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДА

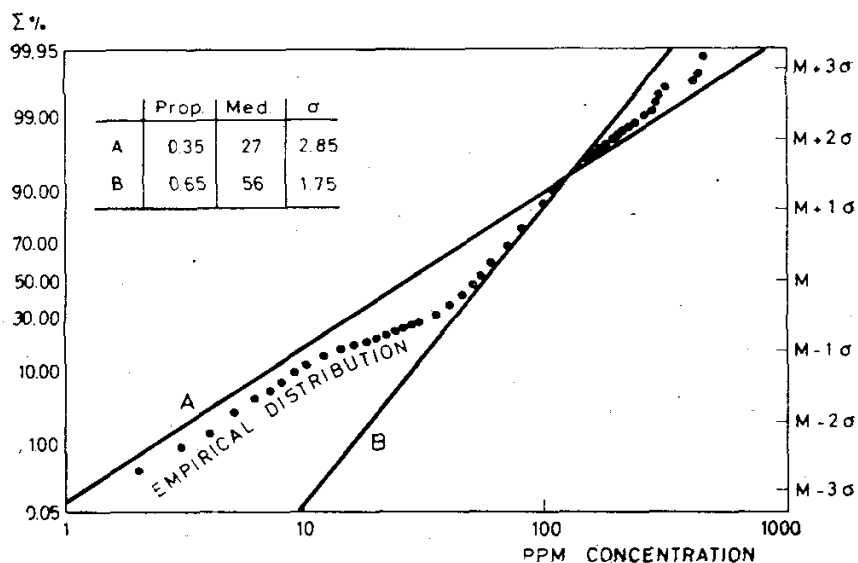
Пример 1. Наиболее высокие значения, составляющие не более 2,5% общего числа наблюдений по площади, Хоукс и Вебб [7] условно рассматривают как аномальные. Если статистическое распределение нерегулярно, Хоукс и Вебб рекомендуют эти весьма высокие содержания исключить из выборки перед ее обработкой. Такое исключение логично, поскольку на всех исследованных площадях будет устанавливаться одна аномальная проба из сорока. Однако устранение ураганных проб трудно выполнить совершенно объективно. Эти трудности можно преодолеть, используя параметры фона вместо параметров эмпирического распределения при группировании аналитических результатов (фиг. 4).

В Геологической службе Норвегии обычно прежде всего определяется графическим методом фон. Для целей поисков концентрации выше медианы фона группируются затем в интервалы, ограниченные целым числом стандартных отклонений фона. Поскольку фон дает прямую линию, эти интервалы концентраций в логарифмическом масштабе будут эквивалентными. Количество групп зависит от отклонения эмпирического распределения от фона.

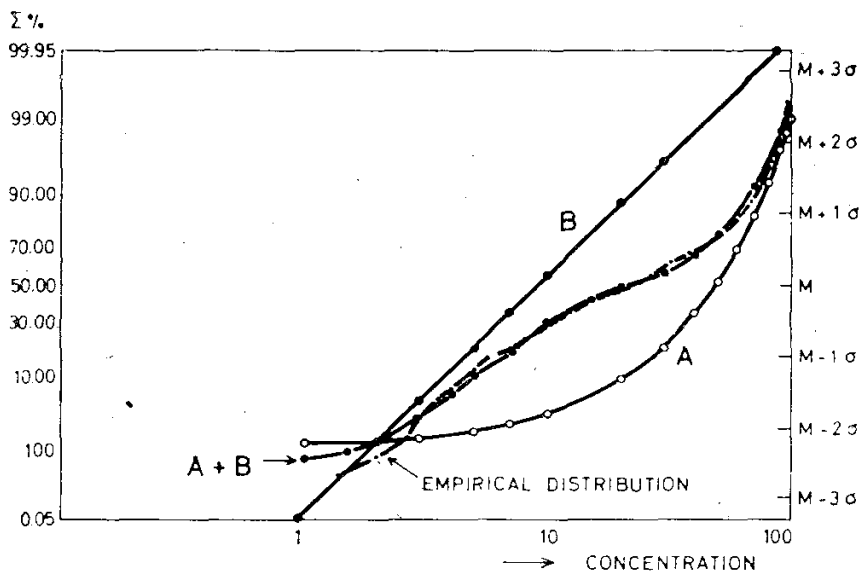
На фиг. 5 приведен пример поисков по потокам рассеяния в северной Норвегии. Часть



ФИГ. 6. Медь в донных осадках.



ФИГ. 7. Медь в донных осадках. Точками показано эмпирическое распределение.



ФИГ. 8. Зола в гумусовом веществе. Штрих-пунктиром показано эмпирическое распределение.

соответствующей геохимической карты изображена на фиг. 6.

Пример 2. Бимодальное распределение геохимических данных может указывать, что в опробованном районе существуют два различных геологических объекта.

Фиг. 7 представляет пример из округа Финмарк, Норвегия. Графическое изображение показывает, что имеются два различных распределения меди, соответствующих линиям А и В. Эти два распределения, вероятно, относятся к двум различным геологическим образованиям. Если предположить, что плотность отбора проб постоянна по площади, объект А ориентировочно занимает 35% всей площади, а объект В—65% всей площади. Для объекта В характерны более низкие значения содержания, тем не менее он включает и самые высокие содержания.

Пример 3. На фиг. 8 приведена выборка содержаний золы в 1250 образцах из гумусового горизонта в округе Норд-Грэнделлаг, Норвегия. Выборка оценена как комбинация 50% нормального и 50% логнормального распределения (А и В соответственно).

Поскольку два распределения объединены в выборку с равными весами, они, возможно, отражают особенности, общие для всех проб. Эти особенности соответствуют двум различным способам происхождения золы в гумусе:

- а) минеральный материал (минералогенная зола);
- б) органический материал (органогенная зола).

Резонно предположить, что логнормальное распределение А соответствует органогенной золе и нормальное распределение В соответствует минералогенной золе.

ВОЗМОЖНОЕ ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА

Описанный метод указывает, каким образом некоторое количество проб может быть от-

несено к фоновым или аномальным, но проблема отнесения проб к фону или аномалиям в целом еще не решена.

Возможно, удастся получить различные классы распределений, соответствующих только фону, только аномалии или комбинациям аномалии и фона, строя графики распределения для отдельных участков всей опробованной площади. Повторяя эту обработку для различных участков, геохимик сможет в конце концов построить геохимическую карту *изораспределений* в дополнение к сегодняшним картам изоконцентраций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ahrens L. H.*, The Lognormal Distribution of the Elements, *Geochim. et Cosmochim. Acta*, 5, 49—73, *ibid.*, 6, 121—131, 1954.
2. *Anderson T. W.*, An Introduction to Multivariate Statistical Analysis, Wiley, New York, 374, 1958.
3. *Brinck J. W.*, *Hofman A.*, The Distribution of Beryllium in the Oslo Region, Norway — A geochemical, stream sediment study, *Econ. Geology*, 59, 79—96, 1964.
4. *Cassie R. M.*, Some Uses of Probability Paper in the Analysis of Size Frequency Distributions, *Aust. Journ. Marine and Freshwater Research*, 5, 513—523, 1954.
5. *Harding J. P.*, The Use of Probability Paper for the Graphical Analysis of Polymodal Frequency Distributions, *Journ. Marine Biol. Ass. U.K.*, 28, 141—153, 1949.
6. *Harris D.*, A Method of Separating Two Superimposed Normal Distributions Using Arithmetic Probability Paper, *Journ. Animal Ecology*, 37, 315—319, 1968.
7. *Hawkes H. E.*, *Webb J. S.*, Geochemistry in Mineral Exploration, Harper & Row, New York, 30—31, 1962.
8. *Lepeltier C.*, A Simplified Statistical Treatment of Geochemical Data by Graphical Representation, *Econ. Geology*, 64, 538—550, 1969.
9. *McCammon R. B.*, Fortran IV Program for Nonlinear Estimation, Computer Contribution 34, State Geol. Surv., Univ. Kansas, Lawrence, 20, 1969.
10. *Tennant C. B.*, *White M. L.*, Study of the Distribution of Some Geochemical Data, *Econ. Geology*, 54, 1281—1290, 1959.
11. *Williams X. K.*, Statistics in the Interpretation of Geochemical Data, *New Zealand Journ. of Geology and Geophysics*, 10, 771—797, 1967.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РУДНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ПОРОДАХ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ РУДОНОСНОСТИ

(Частотное распределение меди в вулканических породах
групп Коппермайн-Ривер и Йеллоунайф,
Северо-Западные территории Канады)

Е. М. Камерон,
В. Р. А. Барагар
Геологическая служба
Канады, Оттава

ВВЕДЕНИЕ

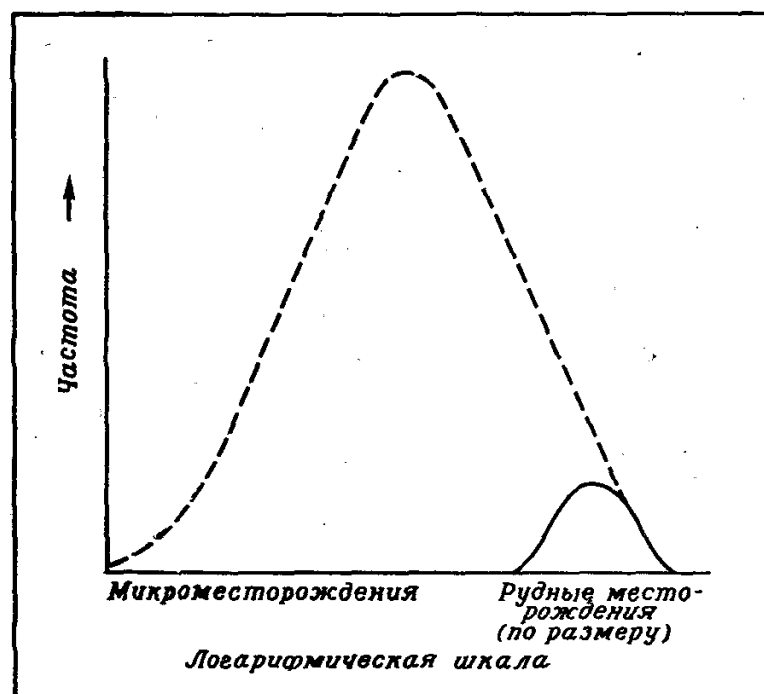
Некоторыми исследователями было показано, что для данного типа месторождений в пределах какого-то региона или крупной геологической структуры рудные тела распределены по размерам случайным образом, а это часто аппроксимируется логнормальным распределением. Аллэ [1] продемонстрировал это на примере рудных месторождений, а Арпс и Робертс [2], Кауфман [6] и другие — на примере нефтяных полей. С точки зрения экономической геологии важность такого открытия заключается в том, что в случае определения частоты встречаемости месторождений дальнейшее их изучение может проводиться с известной степенью вероятности успеха, а затраты на бурение и другие разведочные работы можно оптимизировать, имея в виду возможные открытия.

Очевидно, что верхние и нижние границы этих частотных распределений должны определяться совершенно различными причинами. Верхняя граница имеет «геологическое» происхождение, поскольку крупных месторождений меньше, чем средних. Нижняя граница определяется экономическими соображениями: чем меньше месторождение, тем менее выгодна его отработка, хотя минимальный размер для каждой группы месторождений не постоянен и зависит от большого числа геологических и экономических факторов.

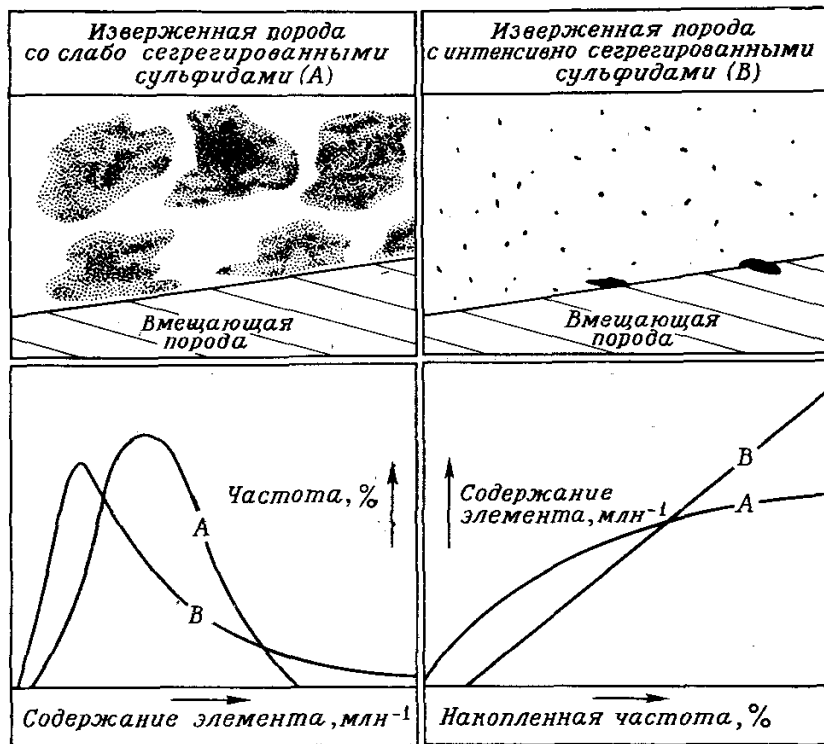
Если рассматривать только размеры месторождений, то кажется вероятным, что большинство совокупностей месторождений представляют собой искусственно усеченные верхние части более общих распределений рудных минералов в основной массе вмещающей породы при условии, что месторождения различных классов по размерам этого общего распределения были образованы существенно теми же самыми геологическими процессами. Размеры скоплений рудных минералов можно классифицировать, начиная от промышленных месторождений, далее через полупромышленные рудопроявления вплоть до зерен и микроскопических частичек рудных минералов. Для удобства

описания классы размеров произвольно подразделены на рудные месторождения, рудопроявления и микроместорождения (фиг. 1). Для сульфидных отложений, описанных здесь, микроместорождения определяются как масса сульфидов, которая может содержаться в объеме среднего по размерам образца породы (250 см³).

Если в пределах данного геологического региона или литологической единицы рудные минералы распределены по логнормальному или какому-либо другому известному закону, т. е. непрерывно от месторождений до микроместорождений, то определение этого закона может иметь определенное значение для оценки потенциальной рудоносности региона или литологической единицы. Однако часто удобнее измерять параметры распределения рудных элементов в пробах пород из региона или образования, чем физические размеры микроместорождений. Вполне очевидно, что эти два измерения связаны между собой, но точная зависимость между химическим составом проб и рас-



ФИГ. 1. Частотное (frequency) распределение размеров рудных тел нередко может представлять собой верхнюю отсеченную часть более обширной совокупности скоплений рудных минералов.



ФИГ. 2. Различающиеся частотные распределения для рудных элементов по пробам, взятым из массивов изверженных пород, где рудный минерал сегрегирован слабо (А) или сильно (В).

Внизу слева приведена диаграмма частоты распределения в % с арифметической шкалой содержаний элементов; внизу справа — диаграмма накопленных частот в % с логарифмической шкалой содержания элементов.

пределением размеров минеральных скоплений в пределах одного и того же геологического образования, вероятно, довольно сложная.

Рассматривая сульфидные месторождения, образующиеся в результате сегрегации сульфидного компонента магмы, мы можем наблюдать два типа распределения (фиг. 2). При распределении типа А сульфиды не были сегрегированы в сколько-нибудь заметной степени, а остались в довольно равномерно рассеянном состоянии в массе породы. Если образцы пород постоянного объема отобраны с этого геологического образования не субъективно и проанализированы на рудный элемент, то распределение рудных элементов можно аппроксимировать нормальным законом распределения (фиг. 2, внизу слева, кривая А). При распределении типа В то же самое количество сульфидов в аналогичной магме было в значительной мере сегрегировано, что привело к образованию рудных скоплений, размеры которых колеблются от промышленных рудных тел до микроместорождений. Если образцы пород, взятых из этого геологического образования, проанализировать на тот же рудный элемент, а значения содержаний в пробах нанести на график с арифметической шкалой, то получится асимметричная кривая распределения со смещенной влево

вершиной по сравнению с предыдущим типом. Если это распределение аппроксимируется логнормальным законом, то, построив кривую накопленных частот в логарифмическом масштабе, мы получим прямую линию (фиг. 2, внизу справа, кривая В). Напротив, кривая накопленных частот типа А будет сильно искривлена. Два резко различающиеся особенности двух распределений, которые особенно четко видны на графике кривых накопленных частот, заключаются в следующем: 1) в большей части интервалов с низкими и средними значениями кривой распределения А пробы характеризуются более высокими содержаниями элементов, чем их эквиваленты в распределении типа В; 2) распределение типа А усечено в области низких содержаний элементов, тогда как распределение типа В непрерывно вплоть до высоких содержаний.

Для того чтобы установить, подтверждаются ли эти теоретические представления в природе, было решено изучить частотное распределение рудного элемента в массиве горных пород, в котором имеются рудные месторождения сегрегационного типа, и сравнить его с распределением того же самого элемента в массиве аналогичной породы, где такие месторождения отсутствуют. Для этого были выбраны две группы основных вулканических пород: группа Коппермайн-Ривер протерозойского возраста, развитая на севере Канады, и группа Йеллоунайф архейского возраста, залегающая в нескольких сотнях километров южнее. Из этих групп были взяты представительные пробы в точках, распределенных по площади случайным образом. В группе Коппермайн-Ривер обнаружены многочисленные рудопроявления меди и по крайней мере одно медное месторождение промышленных масштабов; в группе Йеллоунайф в пределах опробованной площади не установлено рудопроявлений или месторождений меди. Своеобразие природы проявляется в таком очевидном факте [4], что рудопроявления группы Коппермайн-Ривер представляют собой не просто залежи сегрегационного типа, а двухстадийные образования: сначала происходила сегрегация сульфидов, затем мобилизация и концентрация их. Кроме того, медь в вулканических породах группы Коппермайн-Ривер встречается в двух видах: металлическая и сульфидная. В результате предыдущих работ не было установлено существенного различия между содержаниями меди в двух группах вулканических пород: «Распределение меди в породах групп Йеллоунайф и Коппермайн-Ривер очень похоже, однако медные рудопроявления находятся в тесной ассоциации

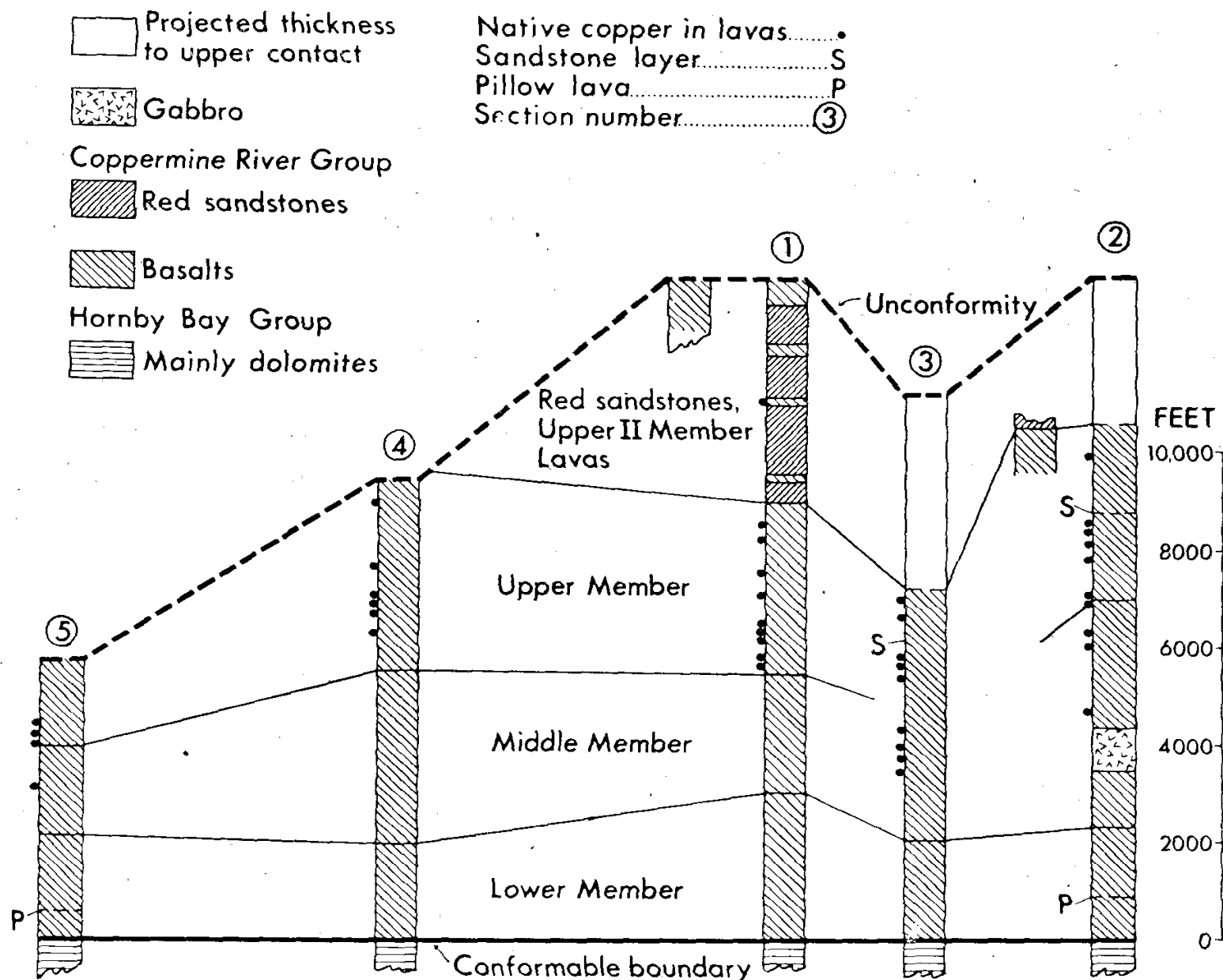
со второй группой и не ассоциируют с первой. По-видимому, исключительно высокое содержание меди само по себе не является существенным фактором для локализации «едных месторождений» [4].

ГРУППА КОППЕРМАЙН-РИВЕР

Общая геология. К группе Коппермайн-Ривер относится нижняя часть преимущественно базальтовых потоков и верхняя часть переслаивающихся красноцветных песчаников и базальтовых потоков. Наиболее точное определение возраста свиты соответствует 1200 млн. лет. Если не считать дизъюнктивной дислокации, то породы этой группы практически не деформированы. Потоки погружаются на север под углом 5—10° и несогласно перекрыты еще более полого падающей толщей сланцев, кварцитов и известняков, возраст которых приблизительно составляет 600 млн. лет. Породы группы рассечены многочисленными разломами. Некоторые из них пересекают всю толщу

пород и как бы разбивают ее на блоки, но эти разломы, по-видимому, не пересекают осадочных образований, несогласно залегающих на породах группы.

Нижняя часть группы представлена монотонной толщей платобазальтов, общая мощность которых составляет примерно 3000 м. Мощность отдельных потоков обычно варьирует от 7 до 25 м, при этом длина некоторых из них по простиранию превышает 15 км. Каждый поток по мере движения снизу вверх постепенно переходит от массивного темного базальтового основания в пенистую красную обычно брекчированную кровлю. Последняя может слагать половину мощности потока, но обычно ее мощность значительно меньше. На основании полевых наблюдений толща базальтов была подразделена на нижнюю, среднюю и верхнюю пачки, среди которых лучше всего обособлена нижняя пачка. Различие между средней и верхней пачками устанавливается не во всех случаях.



ФИГ. 3. Стратиграфические разрезы группы Коппермайн-Ривер.

Минимальная мощность верхней части группы составляет 1220 м; базальтовые потоки слагают менее половины ее объема. Стратиграфические разрезы группы Коппермайн-Ривер по пяти профилям опробования приводятся на фиг. 3.

Рудоносность. В настоящее время медь является единственным металлом, имеющим промышленное значение в группе Коппермайн-Ривер. Она встречается в двух видах: самородный металл в базальтовых потоках и сульфид (преимущественно халькозин) в жилах и трещинах, рассекающих потоки, и реже в кровле потоков. Многочисленные рудопроявления меди были установлены в вулканической толще, при этом почти все они представлены трещинами выполнения или жилами. Киндл [7], а также Киндл и Киркхэм [8] перечислили различные типы месторождений, находящихся на описываемой территории. В настоящее время промышленный интерес представляет только «зона-47» компании «Коппермайн-Ривер». Она находится в зоне дробления, тесно связанной с разломом Теширпи, одним из главных разломов, пересекающих группу Коппермайн-Ривер. Подсчитанные запасы этой зоны до глубины 185 м составляют 3,6 млн. т при содержании 3,44% Cu. В некоторых местах самородная медь образует значительные концентрации в базальтовых потоках и представляет второстепенный промышленный интерес. В одном потоке, опробованном авторами, среднее содержание меди достигает почти 0,1%.

ГРУППА ЙЕЛЛОУНАЙФ

Общая геология. Группа Йеллоунайф архейского возраста, широко распространена в провинции Слейв Канадского щита. К ней относятся более древняя формация вулканических пород, меняющихся по составу от базальтов до дацитов, и более молодая толща граувакк.

Вулканические породы типичны для «зеленокаменного» пояса архея Канадского щита. Они встречаются в виде мощной толщи главным образом подводных лав преимущественно базальтового состава, при этом сиалический компонент составляет примерно 10% общего количества. Два более изученных останца среди разбросанных вулканических пород группы Йеллоунайф относятся к поясу Йеллоунайф и поясу Камерон-Ривер. Оба они детально опробовались [3], но в ходе выполнения настоящего исследования все пробы вновь были проанализированы на медь.

Пояс Йеллоунайф сложен моноклиальной толщей вулканических пород, которые круто

падают на восток. Эти породы интенсивно расчленены более молодыми разломами, но, основываясь на предыдущих геологических исследованиях [5], можно восстановить непрерывный разрез через потоки, общая мощность которых превышает 12 000 м. Два вулканических цикла, каждый из которых представлен основными лавами, перекрытыми дацитовыми потоками, следует один за другим. В каждом цикле состав основных пород постепенно становится все более кислым по мере движения вверх.

Пояс Камерон-Ривер представляет собой круто падающую на запад толщу основных вулканических пород, в верхней части которых содержится слой кислого состава. Мощность пояса составляет примерно 2750 м.

По крайней мере половина потоков, слагающих пояса Йеллоунайф и Камерон-Ривер, представлена подушечными лавами, которые довольно равномерно распределены в вулканической толще. Таким образом, большинство лав, если не все, изливались под водой.

Рудоносность. Золото является главным металлом экономического значения, связанным с группой Йеллоунайф и единственным металлом, добываемым в промышленных масштабах. Значительных медных рудников в поясах Йеллоунайф и Камерон-Ривер не известно, да они и вообще редки в группе Йеллоунайф. В южной части района Маккензи породы группы Йеллоунайф изучены сравнительно хорошо и единственные рудопроявления меди известны около озер Тэрнбэк и Бенджамин, где возможная связь их с вулканическими породами сомнительна. В северной части района Маккензи, где группа Йеллоунайф не так хорошо изучена, относительную распространенность медной минерализации оценить невозможно. Месторождение Хай-Лейк компании «Кеннко» близ залива Коронейшен — самый крупный медный рудник группы Йеллоунайф.

ОПРОБОВАНИЕ И АНАЛИЗ

В ходе выполнения настоящего исследования было проанализировано на медь 195 проб из поясов Йеллоунайф и Камерон-Ривер и 713 проб из группы Коппермайн-Ривер. Каждая проба представляет собой взятый вручную образец весом примерно 200 г. Пробы из группы Коппермайн-Ривер брались по шести профилям, которые пересекают ее от самого нижнего до самого верхнего потоков, вскрытых эрозией, и частично из отдельных обнажений в других участках группы. Пять профилей показаны на фиг. 3. Шестой, не показанный профиль располагается между профилями 1 и 4.

Пробы из группы Йеллоунайф брались по профилям, пересекающим пояса Йеллоунайф и Камерон-Ривер, а также из других участков в пределах этих поясов. Хотя опробование групп Коппермайн-Ривер и Йеллоунайф не было строго случайным, все стратиграфические горизонты и типы пород каждой группы хорошо представлены в проанализированной совокупности проб.

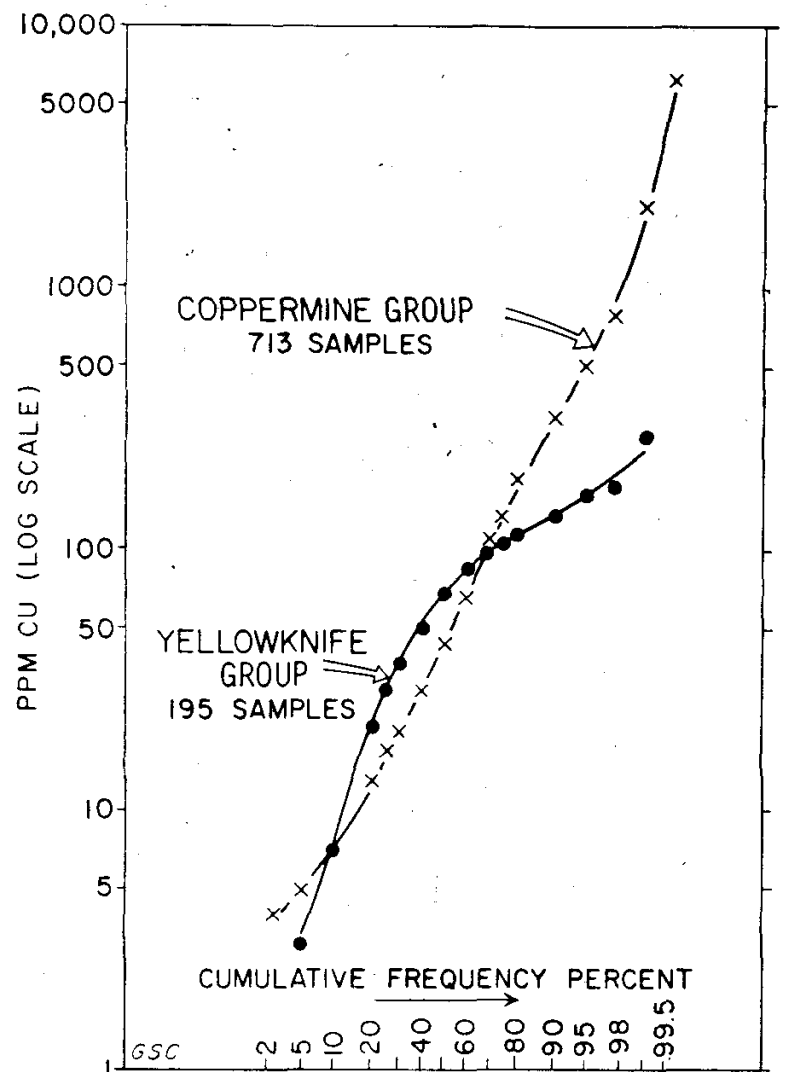
Каждая проба весом в 200 г сначала полностью измельчалась до размеров 6 мм и мельче на дробилке. Полученный материал измельчался затем до фракции менее 1 мм на истирателе Брауна с керамическими пластинами. Десять граммов такого порошка тщательно отквартовывались и растирались примерно до фракции менее 0,1 мм. Полученная пудра использовалась для анализа.

Поскольку потоки рассеяния пород группы Коппермайн-Ривер содержат самородную медь, считалось, что возникнут препятствия для правильного истирания и отквартовки этого материала. Поэтому при кислотном вскрытии использовались относительно большие навески, а пробы, содержащие более $200 \text{ млн}^{-1} \text{ Cu}$, анализировались дважды. В результате эти процедуры позволили преодолеть проблемы, связанные с получением гомогенных проб, и стандартное отклонение для пробы, содержащей $203 \text{ млн}^{-1} \text{ Cu}$, составило всего лишь $4,3 \text{ млн}^{-1}$ при проведении повторных анализов.

Аналитическая процедура заключалась в помещении 1 г пробы в пробирку и добавлении 10 мл 4N HNO_3 . Все это нагревалось на водяной бане при температуре 90°C в течение 1,5 ч; затем добавлялось 40 мл дистиллированной воды и после перемешивания раствор оставлялся на ночь. На следующий день медь определялась атомно-абсорбционным методом с использованием линии меди 3247 Å. Раствор возбуждался при сжигании воздушно-ацетиленовой смеси в одноцелевой горелке. Спектрометр «Перкин-Элмер 303» имеет ширину щели 7 Å и силу тока источника 15 мА.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Различные статистические данные по содержанию меди в группах Коппермайн-Ривер и Йеллоунайф сведены в табл. I. На фиг. 4 сравниваются кривые распределения кумулятивных частот, построенные в логарифмическом масштабе для этих двух групп. Указанные кривые неплохо совпадают по форме и взаимному расположению с кривыми распределений, полученными по теоретическим предположениям относительно альтернативного состоя-



ФИГ. 4. Кумулятивная кривая частотного распределения меди в группах Коппермайн-Ривер и Йеллоунайф.

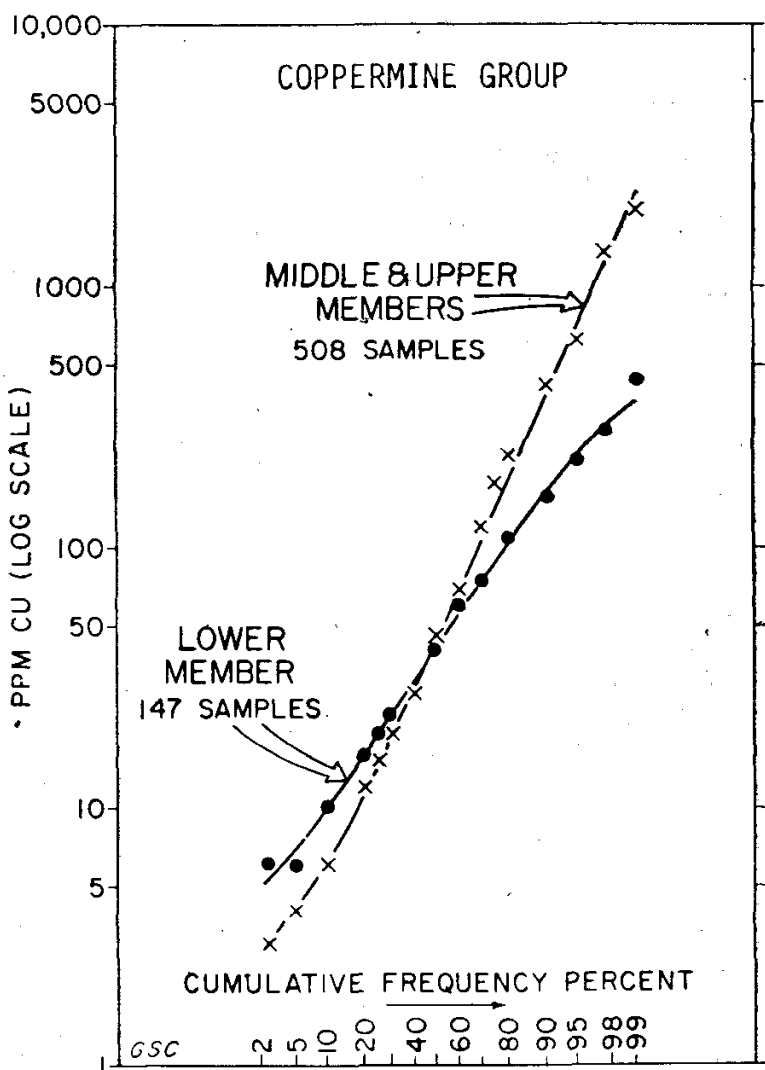
ния металла в диспергированном виде в магме или в сегрегационном состоянии (фиг. 2). Распределение меди в группе Коппермайн-Ривер хорошо согласуется с логнормальным распределением, что очевидно из линейности соответствующей кривой (фиг. 4). Напротив, подобная кривая для проб из группы Йеллоунайф сильно искривлена и лучше аппроксимируется арифметическим нормальным распределением. Заметим, что вплоть до значения 70% кумулятивная кривая для группы Йеллоунайф лежит на более высоком уровне меди, чем для группы Коппермайн-Ривер, после чего она падает быстрее, чем для проб из группы Коппермайн-Ривер. Эти особенности кривых распределения отображены в статистических данных для двух свит в табл. I. Хотя их геометрические средние почти совпадают, арифметическое среднее для группы Коппермайн-Ривер выше, а стандартное отклонение значительно выше, чем соответствующие параметры для группы Йеллоунайф.

Группа Коппермайн-Ривер предоставляет данные для проверки наших предыдущих пред-

Таблица I

Статистические данные для меди по группам Коппермайн-Ривер и Йеллоунайф

Литологические образования	Число проб	Среднее арифметическое	Стандартное отклонение	Среднее геометрическое	Кумулятивные проценты													
					2,5	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	95	97,5	99
Нижняя пачка	147	72,8	106	41,2	6	6	10	16	22	27	41	60	74	109	155	219	280	434
Средняя пачка	182	575	4443	35,3	1	1	4	8	13	18	32	51	76	190	400	592	782	2595
Верхняя пачка	326	251	1293	59,4	4	5	8	15	23	34	53	87	143	236	428	626	1110	2316
Потоки, переслаивающиеся с красноцветными пластами	49	158	241	73,8	9	13	14	20	27	41	57	122	177	288	352	422	506	1540
Силл габбро	9	144	119	103							101							
Общее по группе Коппермайн-Ривер	713	283	2411	49,3	4	5	7	14	21	30	46	69	107	192	342	532	828	2090
Группа Йеллоунайф	195	75,3	61,1	47,7	1	3	7	21	37	50	68	86	100	115	134	163	175	273



ФИГ. 5. Кумулятивная кривая частотного распределения меди в нижней, а также средней и верхней пачках группы Коппермайн-Ривер.

положений. Мы напомним, что рудопроявления и месторождения меди приурочены к средним и верхним пачкам группы. В нижней пачке

значительные зоны минерализации отсутствуют. На фиг. 5 сравниваются кривые распределения кумулятивных частот для меди в нижней пачке группы Коппермайн-Ривер с кривыми для проб из средней и верхней пачек. И хотя различие выражено не столь резко, как между группами Коппермайн-Ривер и Йеллоунайф, видна аналогичная зависимость формы и взаимного расположения кривых от наличия или отсутствия минерализации. Безрудная пачка пород опять богаче медью в левой части кривой (вплоть до 46%), но выше этой пачки кривая для безрудной части спадает быстрее, чем для рудоносной средней и верхней пачек.

Найти функцию распределения для группы Коппермайн-Ривер, вероятно, не очень трудно, особенно для средней и верхней пачек, если применить ее (с соответствующим изменением критерия меры) и к рудопроявлениям и к месторождениям. С другой стороны, частотное распределение для группы Йеллоунайф выполняется на сравнительно низком уровне содержания меди.

Наши предыдущие представления о непрерывном продолжении частотного распределения указанных размеров от микроместорождений через рудопроявления до месторождений было основано на допущении, что они формировались при совершенно аналогичном сочетании геологических процессов. Вряд ли это абсолютно верно для группы Коппермайн-Ривер, скорее начальная сегрегация сульфидов происходила в магме. Именно первичная сегрегация и отражена, вероятно, в кривых частотных распределений. По крайней мере два последних фактора влияли на эти первичные

сульфиды. Первый заключался в восстановлении сульфида меди в самородную медь в большей части объема потока, второй — в мобилизации сульфидов меди, возможно в верхних пористых частях потоков [4], и локальной миграции к соседним зонам трещиноватости, где медь переотложилась в виде сульфидов. Однако степень первичной сегрегации оказывает доминирующее влияние на весь процесс образования месторождения и таким образом кривые частотного распределения меди в группе Коппермайн-Ривер дают возможность превосходно предсказывать потенциальную рудоносность.

Группа Йеллоунайф характеризуется совершенно другим типом частотного распределения меди по сравнению с группой Коппермайн-Ривер, что находится в соответствии с видимым отсутствием месторождений аналогичного типа в этой толще пород. Главный тип медных месторождений архейских «зеленокаменных» поясов представлен «массивными сульфидами». Неизвестно, являются ли такие рудные тела результатом первичной сегрегации сульфидного компонента магмы. Авторы намерены детально опробовать различные образования в пределах минерализованного зеленокаменного пояса, чтобы установить, позволят ли подобные характеристики частотных распределений рудных элементов, отличающие группу Коппермайн-Ривер от группы Йеллоунайф, выделить минерализованные архейские пояса или толщи среди безрудных отложений.

Если мы рассмотрим фундаментальные химические причины, обуславливающие различия в кривых распределения меди в этих двух группах, то наиболее вероятной причиной окажется первоначальное содержание серы в основной магме. При избытке серы произведение растворимости для сульфидов меди будет превышено раньше в ходе кристаллизации магмы, и несмешивающаяся сульфидная жидкость сможет отделиться до начала главного периода кристаллизации силикатов. Следовательно, несмешивающиеся сульфидные капельки будут иметь возможность скорее соединиться, чем попадать в промежутки между кристаллами силикатов. Вследствие своего резко халькофильного характера по сравнению с железом медь будет преимущественно концентрироваться в этих ранних сульфидных жидкостях. Поэтому сульфиды, отделяющиеся позже, будут обеднены медью; попадая в промежутки между кристаллами силикатов, они рассеиваются в магме. Предполагается, что высокое исходное содержание серы приводит к обогащению медью тех проб, которые содержат первичные сегрега-

ционные компоненты, и к обеднению медью большей части остальной породы, т. е. характер распределения аналогичен установленному в группе Коппермайн-Ривер. В магме с пониженным содержанием серы произведение растворимости для сульфидов металлов не будет превышено на ранних этапах кристаллизации магмы. Отделение сульфида меди в виде кристаллов или жидкости произойдет позже, когда индивидуализированные зерна или капельки сульфида, вероятно, будут захвачены породой и попадут в промежутки между зернами силикатов и, следовательно, будут широко рассеяны в основной породе.

Существуют весьма очевидные трудности в предсказании наличия или отсутствия рудных месторождений по особенностям распределения наиболее часто встречающихся компонентов, принадлежащих единой совокупности минерализации. Однако остается фактом, что для изученных примеров установлено наличие четкой корреляции между теоретическим и реальным распределениями в рудоносных (с месторождениями сегрегационного типа) и безрудных толщах. Решение этой проблемы можно осуществить только путем дальнейших эмпирических исследований такого рода. В результате исследований должно быть выяснено, относятся ли микроместорождения сульфидов или других рудных минералов к той же самой совокупности, что и ассоциирующие рудопроявления и рудные месторождения, и если это так, то на каком интервале значений справедлива функция распределения. Для изучения рудных месторождений сегрегационного типа, описанных выше, пробы брались из совокупности обнажений, охватывающих всю площадь выхода массивов. Для других типов рудных месторождений, видимо, целесообразнее ограничить эту совокупность. Так, при исследовании гидротермальных рудных месторождений совокупность, подлежащая опробованию, может быть ограничена жильным материалом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Allais M.*, Méthode d'évaluation des perspectives économiques de la recherche minière sur de grands espaces — Application au Sahara Algérie, *Revue d'Industrie Minérale*, Special Issue 1R, January, 1956, Article translated and published in *Management Science*, 3, № 4, 285—347, 1956.
2. *Arps J. J.*, *Roberts T. G.*, Economics of Drilling for Cretaceous Oil Production on the East Flank of the Denver — Julesburg Basin, unpublished paper quoted by G. M. Kaufman, 1963, 1958.
3. *Baragar W. R. A.*, Geochemistry of the Yellowknife Volcanic Rocks, *Can. J. Earth Sci.*, 3, 9—30, 1966.
4. *Baragar W. R. A.*, The Geochemistry of Coppermine

- River Basalts, Geol. Surv. Canada, Paper 69-44, 1969.
5. *Henderson J. F., Brown I. C.*, Geology and Structure of the Yellowknife Greenstone Belt, District of Mackenzie, Geol. Surv. Canada, Bull. 141, 1966.
 6. *Kaufman G. M.*, Statistical Decision and Related Techniques in Oil and Gas Exploration, Prentice Hall, Inc., Englewood, Cliffs, N.J., 307, 1963.
 7. *Kindle E. D.*, The Nature of the Coppermine River Copper Deposits (860 and 86N), in Rept. of Activities Geol. Surv. Canada, Paper 69-1, Pt. A, 112—113, 1969.
 8. *Kindle E. D., Kirkham R. V.*, Coppermine River Copper Deposits, District of Mackenzie (86N, 860), in Rept. of Activities, Geol. Surv. Canada, Paper 70-1, 94—95, 1970.

АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ РАЗВИТИЕ ПРОГРАММЫ ГЕОХИМИЧЕСКИХ ПОИСКОВ

Е. К. Дальберг

«Пан-Америкэн-петролеум-корпорейшн», Тулса, Оклахома

ВВЕДЕНИЕ

Лица, имеющие опыт в области методов геохимических исследований, часто оказываются в затруднительном положении при ответе на вопрос: «Если бы вы были директором компании, стали бы вы бурить дорогостоящие скважины, основываясь на геохимических данных?» Возможно, это объясняется рядом неудач, с которыми имели дело специалисты при осуществлении проектов такого типа; но более вероятно, что это обусловлено недостаточной разработкой методики геохимических поисков.

Основной причиной неудач при проведении геохимических поисков, по-видимому, является то, что в настоящее время действительно не существует иного способа оценки эффективности методики, кроме как по результатам поисков. Это означает, что исследователь в редких случаях может определить, окупится ли полностью «геохимический» доллар, из-за нежелания дирекции затратить денежные средства для проверки эффективности геохимических работ. Директор же вполне оправданно откажется проводить буровые работы, основываясь на геохимических данных, пока он не будет убежден, что эта информация вполне достоверна. Таким образом, возникает замкнутый круг.

Алгоритм, описываемый в настоящей статье, не дает решения этой проблемы. Однако предпринимается попытка заранее составить полную схему, на которой зафиксирована вся программа исследования. В схему включены промежуточные стадии, моменты принятия решений и тщательные проверки для оценки выполнения программы на основе выбранных критериев. Результаты проверок позволяют решить, стоит начинать работы сначала либо изменить или прекратить выполнение программы.

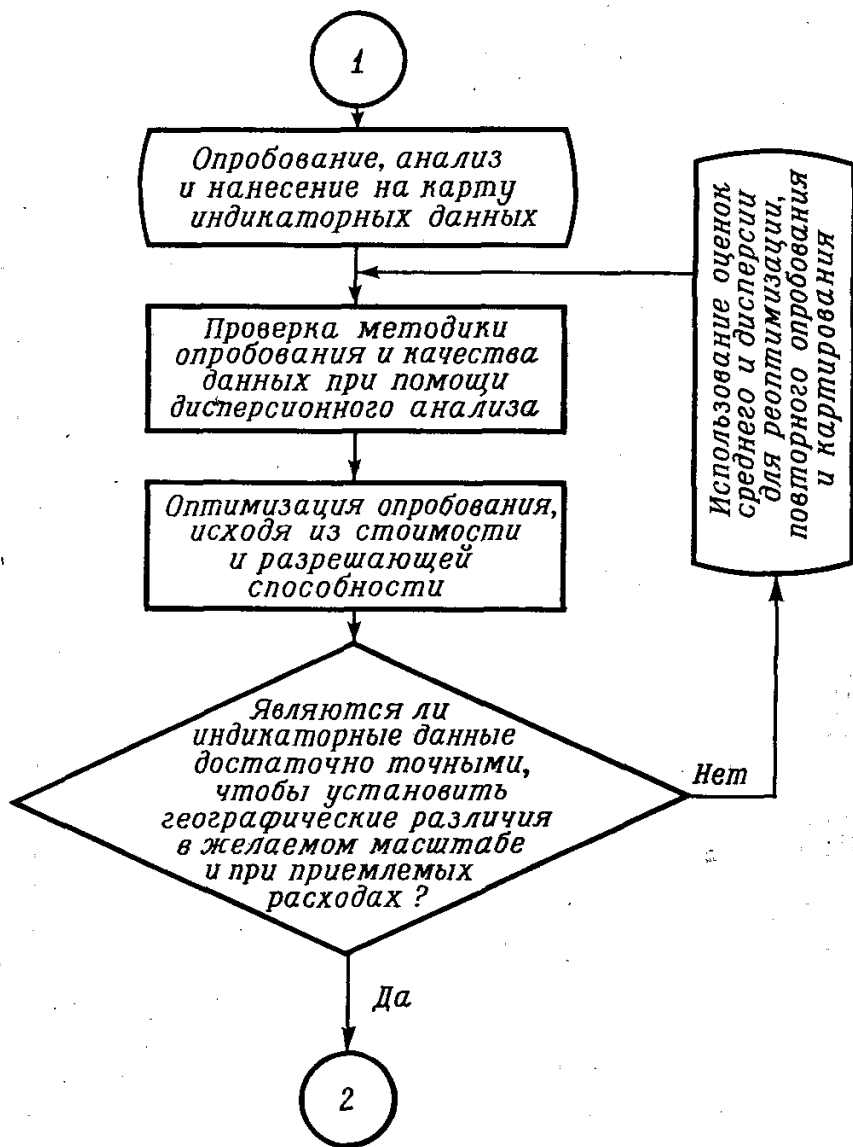
Путем поэтапного достижения отдельных промежуточных целей, описанных ниже, исследователю удастся своевременно установить, что вероятность неудачи на последнем этапе очень велика или что необходимо изменить методику и др.

Основополагающий принцип — это принцип обратной связи. Возможно, он аналогичен коррекциям во время полета, отделениям ступеней и т. д., осуществляемым при запусках на Луну, которые должны оптимизировать достижение цели при посадке на Луну и мягком приземлении на обратном пути с учетом безопасности космонавтов.

Сам метод относится к области качественного контроля четырех критических аспектов полезной информации, получаемой при геохимических исследованиях: это точность, ответственность, воспроизводимость и надежность получаемых данных. Именно эти свойства служат критериями при отбраковке, которую должна пройти геохимическая информация для того, чтобы вероятность успеха программы была оптимальной. Механизм отбраковки в этих специфических проверках статистический.

Алгоритм позволяет выявлять трудности, которые в прошлом, вероятно, способствовали неудачам аналогичных проектов, а также позволяет предвидеть некоторые ошибки и найти способ избежать их. Надеемся, что использование в программах исследований алгоритмов, возможно, позволит директорам с большей уверенностью финансировать подобные исследования. Применение такого алгоритма не может наверняка обеспечить успех исследования, но предположительно может увеличить вероятность успеха за счет выявления вероятности неблагоприятного исхода до полного завершения работ.

1. Оценка точности измерения и ошибки



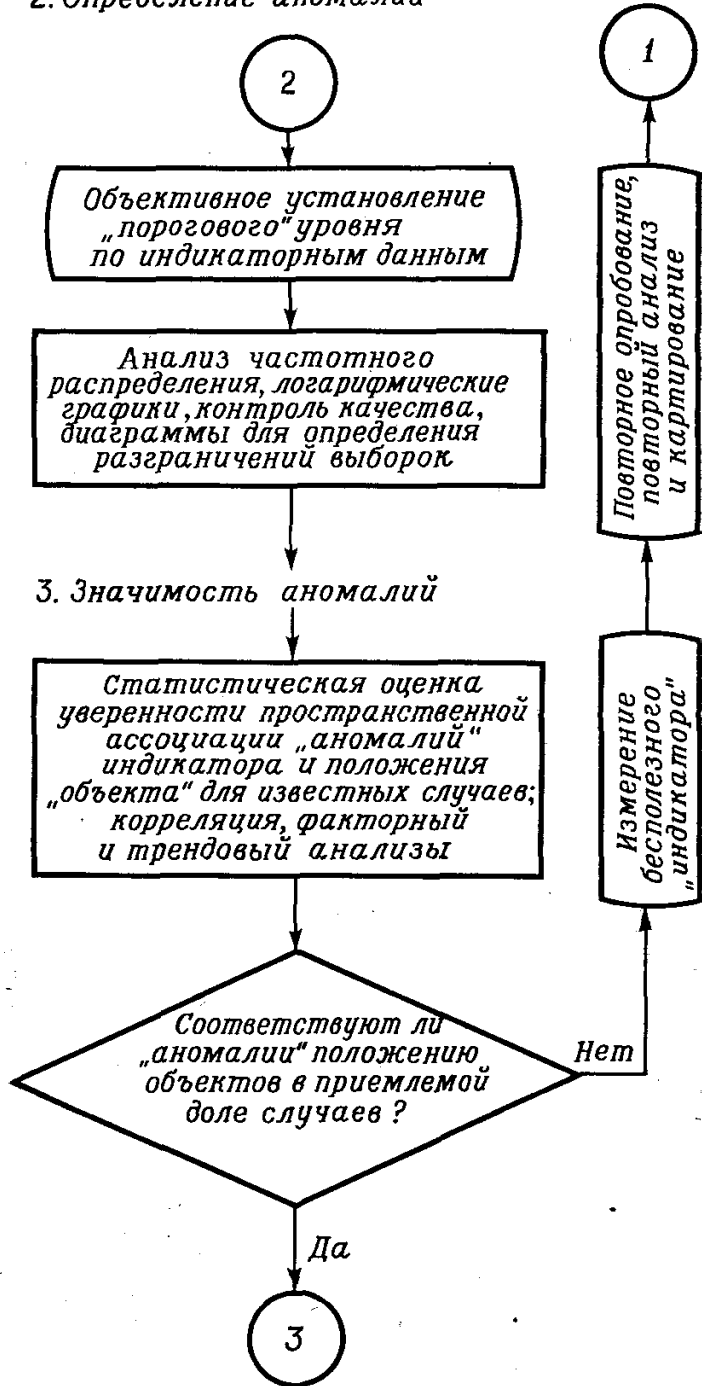
ФИГ. 1. Схема первой части алгоритма.

ТОЧНОСТЬ

При переходе от исходной коллекции проб к анализу индикаторных данных в виде содержаний отдельного элемента-указателя, или индикатора, который считают связанным с объектами некоторого типа, необходимо определить, достигнута ли достаточная разрешающая способность. Главный вопрос заключается в том, существуют ли и при каких уровнях становятся заметными реальные различия в числах и являются ли статистически значимыми закартированные особенности распределения, характеризующие изменения содержания индикатора.

Описываемому случаю в наибольшей мере подходят методы дисперсионного анализа, по-

2. Определение аномалии



ФИГ. 2. [Схема второй части алгоритма.

средством которого устанавливается влияние вариаций, возникающих при опробовании, обработке проб, их анализе и других операциях, являющихся источниками вариации для величин, нанесенных на карту. Одновременно оцениваются эффекты указанной вариации [10, 2, 14]. Келли и Мак-Манус [12], а также Крамбейн и Грейбилл [13] показали, что оценка дисперсии может быть применена и к анализу затрат.

На фиг. 1 приведена схема, отображающая этапы, ведущие к моменту принятия решения, представленному в виде ромба. При отрицательном ответе следует прервать программу исследования, если выясняется, что стоимость соответствующей разрешающей способности слишком высока или программа оказывается

рискованной. После этого работа в значительной мере переделывается. Положительный ответ стимулирует продолжение программы.

Поскольку теперь можно считать со значительной степенью уверенности, что различия на карте «реальны» и разрешающая способность приемлема, принцип подразделения значений индикатора на аномальные и неаномальные может быть точно установлен. В прошлом исследователи делали это статистическим путем. Они определяли такой уровень, что если значения индикатора, соответствующие данным пробам, превышали его, вероятность принадлежности этих значений к статистической совокупности, характеризующей исследуемую область (геологическую среду), оказывалась малой. При этом недостаточная однозначность определения указанной совокупности и характеризующих ее функций распределения приводила к тому, что порог устанавливался, в сущности, произвольно. В некоторых случаях тот же эффект дает априорное отнесение к аномальным 5 или 10% проб с наиболее высокими содержаниями. Относительная произвольность установления порогового значения не может быть переоценена. Де Жоффруа, Ву и Хейнс [7] описали метод определения порогов как функцию пространственной воспроизводимости, что представляет большой интерес, поскольку и абсолютная величина и сближенность в пространстве представляют собой важные информационные характеристики геохимических наблюдений.

СООТВЕТСТВЕННОСТЬ

Имея карту «аномалий» (которая до настоящего момента только выделяет группы проб, отличающиеся по содержанию индикатора от некоторых других проб), необходимо оценить степень, в которой эти «аномалии» соответствуют пространственному размещению известных объектов, т. е. долю благоприятных случаев в процентах. Наоборот, доля аномалий, совпадающих с известными заведомо безрудными участками, должна быть приемлемо мала (хотя и не равна нулю) для эффективного уменьшения неопределенности при исследованиях.

Оценка уверенности и правдоподобности ассоциации аномалия — известный объект должна быть изучена и проверена такими многомерными методами как факторный анализ [5, 8, 3, 15], множественная регрессия [2, 3, 16] и каноническая корреляция [1]. Именно эти методы позволяют исследовать природу и значение объектов, от которых зависит вариация содержания элемента-индикатора. Для усиления вы-

разительности площадного распределения индикатора, а также соответствия (если возможно) между «аномалиями» и расположением известных объектов может применяться, кроме того, анализ трендов.

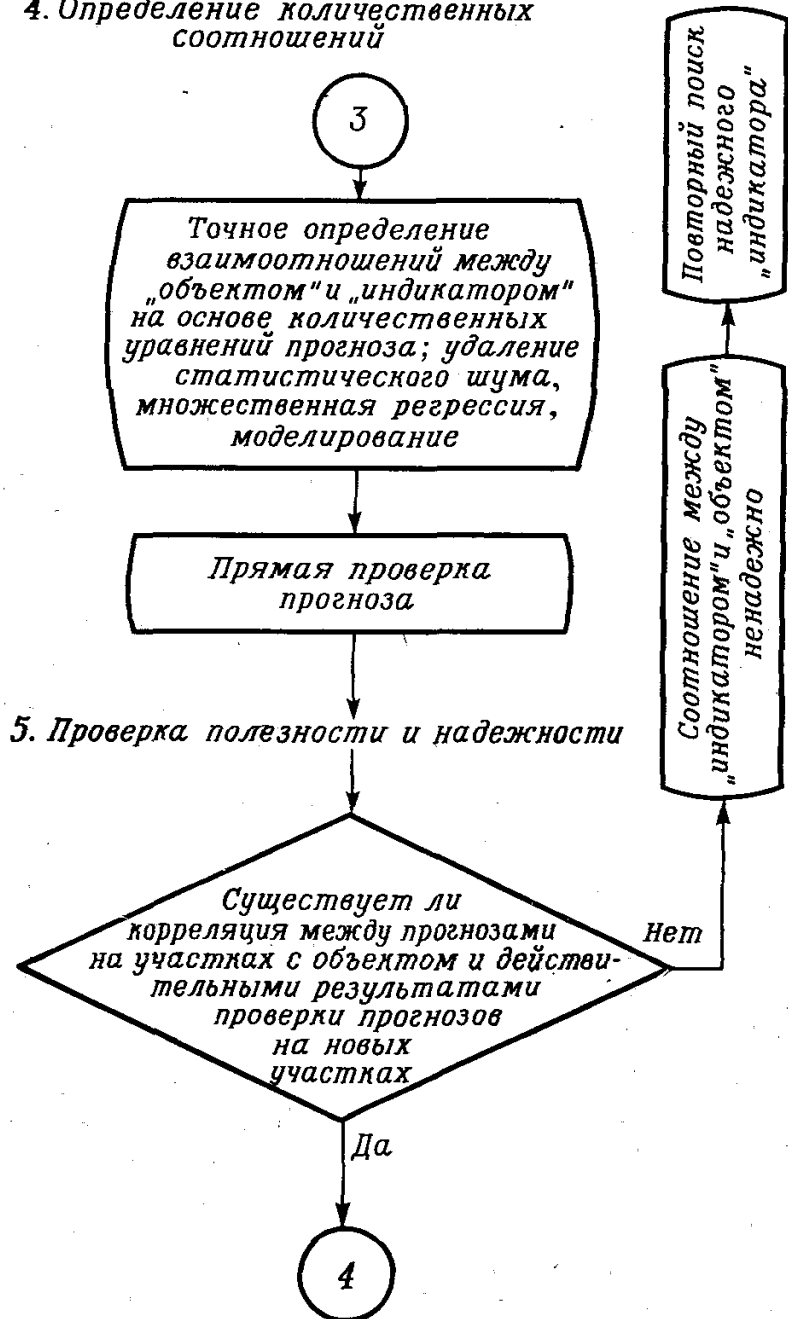
Если тест, представленный в виде ромба (фиг. 2), приводит к отрицательному ответу, то принимается решение либо опробовать на новый индикатор и провести исследование с самого начала алгоритма, либо прекратить работу. При положительном результате работа продолжается.

Некоторые вышеупомянутые статистические методы дают уравнения, которые могут быть использованы для прогнозирования. Обычно они имеют вид, который в случае множественной регрессии отображает какое-то важное свойство объекта (например, запасы, содержание рудного элемента в процентах, размеры и др.) в виде функции содержания нескольких элементов-индикаторов или факторных значений, основывающихся на сочетании переменных содержаний индикатора. В случае канонической корреляции уравнение устанавливает зависимость между группой критериев объекта и группой переменных содержаний элемента-индикатора (и желательно геологических характеристик). Полученные коэффициенты соответствуют максимизации степени корреляции между этими двумя группами признаков. Для более быстрого осуществления данной фазы программы работ могут также применяться и парный и множественный дискриминантные анализы [9, 11, 6, 4]. Все они являются моделями прогнозирования.

ВОСПРОИЗВОДИМОСТЬ

Для площадей, где рудные объекты не известны, измеренные величины параметров распределения индикаторов вводятся в конкретные модели прогнозирования, а закартированные аномалии оцениваются и затем разбуриваются. В этот момент проверяется степень успеха рассматриваемого метода; успех оценивается в относительных долях, так как необходимо предвидеть некоторую степень неудачи. Например, если один удачный прогноз на каждые пять неудачных приемлем для исследователя, то можно принять, что соотношение объект — аномалия — индикатор достаточно воспроизводимо после предыдущей подготовительной фазы (во время этой фазы аномалии распознавались на уже установленных объектах) на стадии испытания и проверки, когда аномалии разбуривались в ходе естественной последовательной смены операций.

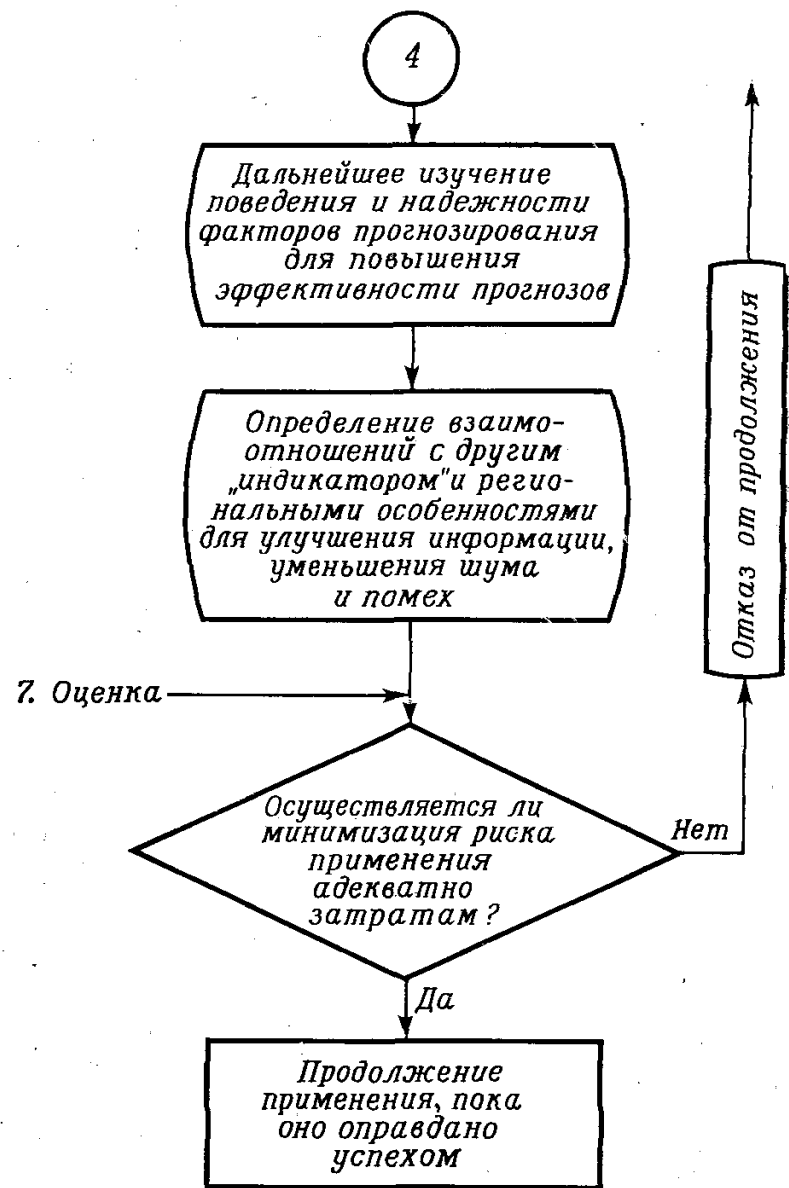
4. Определение количественных соотношений



ФИГ. 3. Схема третьей части алгоритма.

Как показано на фиг. 3, неудача при попытке достичь желаемого уровня успеха отражает противоречивость модели прогноза для системы анализ — индикатор — объект при переходе от одного участка к другому. Поэтому, если это экономически выгодно, подбирают новый индикатор и обработку его производят по всему алгоритму с самого начала. Достижение приемлемой степени успеха побуждает к продолжению работы. Приемлемая степень успеха обычно определяется промышленной значимостью объекта. В случае очень богатого объекта, который представлен удобно расположенным, неглубоко залегающим месторождением с высоким содержанием меди, малая вероятность успеха будет приемлемой, поскольку одно открытие полностью оправдывает все затраченные усилия. Для бедного объекта потребуется сравнительно высокая степень успе-

6. Применение, уточнение и дальнейшее развитие



ФИГ. 4. Схема последней части алгоритма.

ха, чтобы повысить экономическую эффективность, так как ожидаемая прибыль является функцией вероятностного вознаграждения, превышающего все возможные расходы.

НАДЕЖНОСТЬ

Тот факт, что методика выполнялась в соответствии с требованиями и была проверена на примере, вовсе не означает, что она окончательно апробирована. Как показано на фиг. 4, именно на этой последней стадии рассматривается эффективность методики в свете всех денежных расходов, затраты времени и усилий; итоговая целесообразность рассматривается по завершению работ на основе финансового успеха.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Немедленной реакцией читателя на все изложенное выше, вероятно, будет оправданное сомнение. Читатель сделает вывод: «Гладко было на бумаге, но с точки зрения практики это нереально».

Однако цель настоящей статьи состояла в том, чтобы только предложить алгоритмы или план как возможный способ синтезирования программы геохимических (или любых) поисков — от проектирования до завершения работ. В таком свете это предлагается не как единственный, а только как один из многих возможных, предположительно чувствительных, упорядоченных способов выполнения геохимических работ.

Применение такой схемы не всегда обеспечит успех, но позволит исследователю дифференцировать информацию и дезинформацию на промежуточных этапах программы, а это послужит целям увеличения вероятности успеха не только в академическом, но и экономическом смысле.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cooley W. W., Lohnes P. R., *Multivariate Procedures for the Behavioral Sciences*, John Wiley and Sons, Inc., New York, 211, 1962.
2. Dahlberg E. C., *A Multivariate Study of Some Aspects of Trace Metals in Stream Sediments as Guides to Locating Mineral Deposits*, Unpubl. PhD thesis, The Pennsylvania State University, 163, 1967.
3. Dahlberg E. C., *Use of a Model for Relating Geochemical Prospecting Data to Geological Attributes of a Region, South Mountain, Pennsylvania*, Quarterly, Colo. School of Mines, 64, № 1, 195—216, 1969.
4. Dahlberg E. C., *Generalized Bayesian Classification*

Functions — Classes, Econ. Geol., 65, 220—222 1970.

5. Dahlberg E. C., Keith M. L., *Distribution of Trace Metals in Modern Stream Sediments from Three Geologically Different Terranes*, abs., Geol. Soc. Amer., Special Paper, 101, 48, 1966.
6. Dahlberg E. C., Rose A. W., Whittemore D. O., *Quantitative Evaluation of Mineral Deposit Favorability Using Stream Sediment Geochemical Criteria* (abs.), by title, G. S. A. Meeting, Mexico City, Mexico, November 1968.
7. De Geoffroy J., Wu S. M., Heins R. W., *Selection of Drilling Targets from Geochemical Data in the Southwest Wisconsin Zinc Area*, Econ. Geol., 63, 787—795, 1968.
8. Garrett R. G., Nichol I., *Factor Analysis as an Aid in the Interpretation of Regional Geochemical Stream Sediment Data*, Quarterly, Colo. School of Mines, 64, № 1, 245—264, 1969.
9. Griffiths J. C., *Application of Discriminant Functions as a Classification Tool in the Earth Sciences*, Kansas Geol. Survey, Computer Contr., 7, 48—51, 1966.
10. Griffiths J. C., *Scientific Method in Analysis of Sediments*, McGraw-Hill Book Co., New York, N.Y., 508, 1967.
11. Harris D. P., *An Application of Multivariate Statistical Analysis to Mineral Exploration*, unpubl. PhD thesis, The Pennsylvania State Univ., 261, 1965.
12. Kelley J. C., McManus D. A., *Optimizing Sediment Sampling Plans*, Marine Geology, 7, 465—471, 1969.
13. Krumbein W. C., Graybill F. A., *An Introduction to Statistical Methods in Geology*, McGraw-Hill Book Co., New York, 475, 1965.
14. Miesch A. T., *Experimental Design in Geochemical Exploration*, oral presentation, International Geochemical Exploration Symposium, Colo. School of Mines, April 1968, 1968.
15. Nichol I., Garrett R. G., Webb J. S., *The Role of Some Statistical and Mathematical Methods in the Interpretation of Regional Geochemical Data*, Econ. Geol., 64, 204—220, 1969.
16. Rose A. W., Dahlberg E. C., Keith M. L., *A Multiple Regression Technique for Adjusting Background Values in Stream Sediment Geochemistry*, Econ. Geol., 65, 156—165, 1970.

СОДЕРЖАНИЕ ГЛАВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КАК ФАКТОР, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЙ КОЛЕБАНИЕ ФОНОВЫХ СОДЕРЖАНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ В ДОННЫХ ОСАДКАХ

А. В. Роуз, Н. Х. Сур

Факультет геохимии
и минералогии,
Пенсильванский
государственный
университет

ВВЕДЕНИЕ

При интерпретации геохимических данных опробования донных осадков и других природных объектов обычно считается, что величины фоновых значений зависят от многочисленных геологических, геохимических и физических

факторов. Эти факторы необходимо оценить, чтобы отделить пробы, относящиеся к фону, от проб, заслуживающих дальнейшего изучения. К важным факторам относятся типы пород в дренируемом бассейне, pH, Eh и количество тонкообломочного материала, глины и окислов железа в пробе.

Для расширения представлений о различных факторах были детально исследованы химизм, минералогия, физические особенности и распределение микроэлементов между минеральными фазами. Для этого из донных отложений было взято наугад 40 проб, из числа 2800 проб, отобранных на площади 19 500 кв. км в юго-восточной части Пенсильвании. Результаты наших детальных исследований и литературные данные позволяют считать, что состав главных элементов в пробах можно использовать для предсказания изменений содержания микроэлементов в пробах, характеризующих фон. Чтобы сделать такое предсказание количественным, было вычислено уравнение регрессии для двух групп данных опробования донных осадков с использованием метода Роуза, Далберга и Кейта [10]. Различные геологические и химические параметры проб принимались за независимые переменные регрессии и использовались для предсказания содержания интересующего микроэлемента. Затем истинное содержание элемента в пробе сравнивалось с предсказанным значением, а большая положительная разница принималась за доказательство влияния какого-то фактора, не учтенного в регрессии, например рудного тела.

О первом опыте использования типов пород, рельефа местности и содержаний Fe и Mn в качестве предсказателей содержания Cu, Zn, Ni, Co, Cr и V в потоках рассеяния на площади 19 500 кв. км говорилось ранее [10, 9]. При более позднем опыте, описанном в настоящей статье, подвергались проверке данные по содержанию Fe, Mn, Ca, Al и Mg, данные о типах пород и размерах зерен, но на меньшем количестве проб. Результаты обоих исследований показывают, что главные элементы обычно являются эффективными предсказателями микроэлементов и могут использоваться при установлении значений фона.

ДЕТАЛЬНЫЕ ХИМИЧЕСКИЕ И МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Из 2800 проб, взятых в юго-восточной части Пенсильвании [7], при помощи таблицы случайных чисел [3] было выбрано 40 проб. Анализируемые пробы представляли собой фракции донных осадков с размером зерен менее 0,25 мм. Пробы высушивались в печи при 110° С.

Согласно дифрактометрическому анализу этих 40 проб, главные минералы представлены кварцем, мусковитом, иллитом, каолинитом, вермикулитом, калиевым полевым шпатом и

плагиоклазом. В некоторых пробах в значительных количествах присутствуют кальцит и темноцветные минералы; кроме того, под микроскопом наблюдаются ильменит, магнетит и другие акцессорные минералы. Довольно часто отмечаются коричневые и красные корочки окислов железа на зернах минералов, а также небольшое количество растительных остатков и органического материала.

Для 20 проб были проведены более детальные исследования, которые свидетельствуют о распределении элементов по минеральным фазам. Для этого применялась следующая обработка проб, модифицированная согласно Джексону [6].

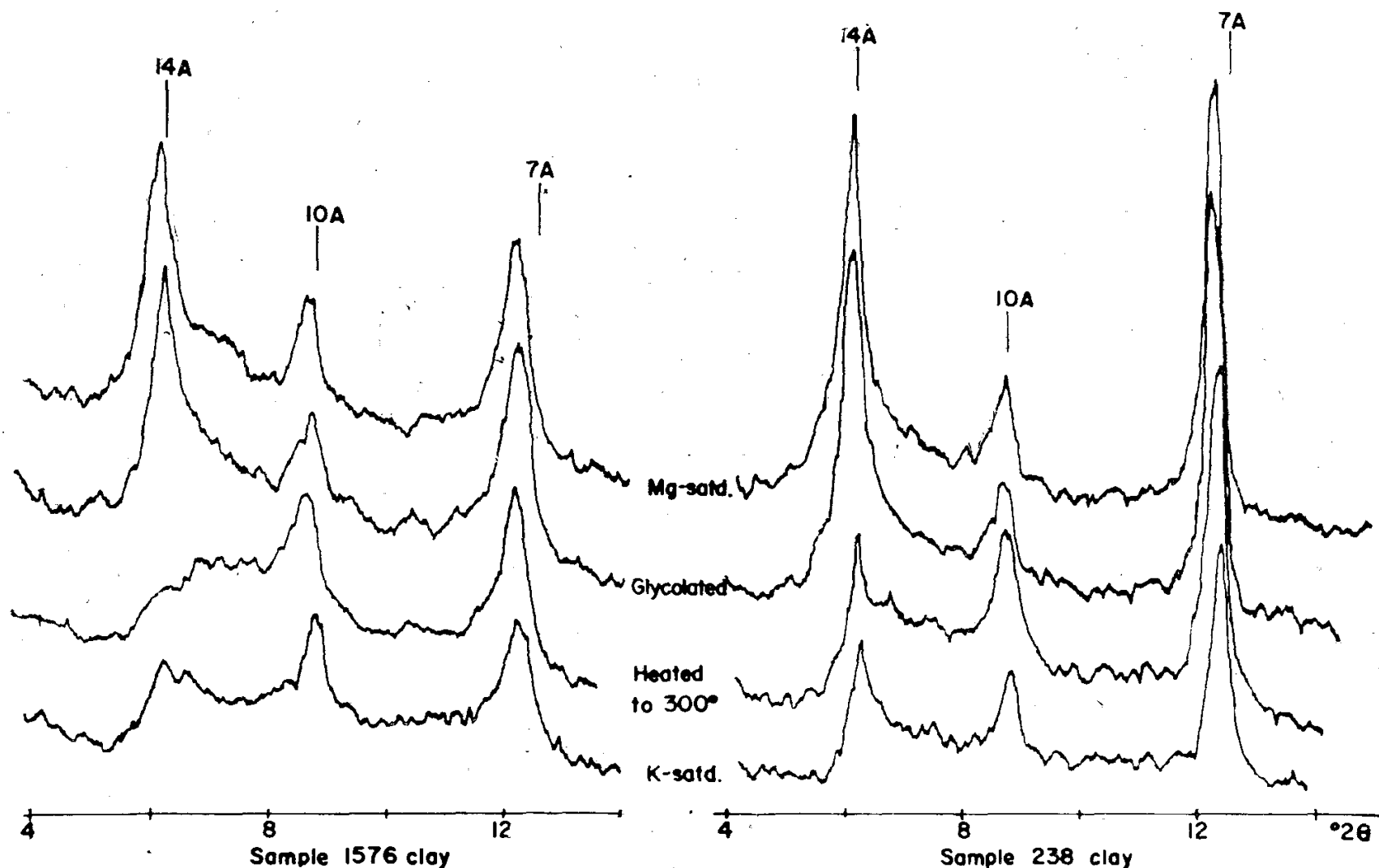
1. Выщелачивание раствором уксусного натрия, из которого была приготовлена буферная смесь со значением pH, равным 5, путем добавления уксусной кислоты. При такой обработке удаляются обменные ионы, растворимые минералы и в меньшей мере некоторые карбонаты. Растворы, полученные после двухсуточного выщелачивания при помощи указанного реагента, анализировались на атомно-абсорбционном спектрометре для определения элементов, перешедших в раствор, которые были названы «холодными экстрагентами».

2. Нерастворившаяся твердая фаза, находившаяся во влажном состоянии, обрабатывалась H₂O₂. Избыток перекиси водорода разлагался путем нагревания, а высвобожденные элементы растворялись в растворе уксуснокислого натрия и определялись так же, как и в первом случае. При такой обработке растворяется органическое вещество, окислы марганца и сульфиды, которые условно называются «органической» фракцией.

3. Нерастворимый остаток после предыдущей обработки подвергается воздействию дитионита натрия в составе буферной смеси лимоннокислого натрия и бикарбоната натрия. В результате этого растворяется лимонит и другие окислы и гидроокислы окисного железа. Некоторые интересующие нас микроэлементы в ходе указанного процесса образовывали сульфиды, которые разлагались при помощи H₂O₂, а остаток растворялся в растворе уксуснокислого натрия.

4. Остаток во влажном состоянии просеивался через сито с размером ячейки 44 мкм. Более крупнозернистая фракция, названная песчаной, высушивалась при 110° С и взвешивалась.

5. Полученная более мелкозернистая фракция разделялась путем центрифугирования на шламовую фракцию (4—44 мкм) и глинистую фракцию (<4 мкм). Глинистые частицы



ФИГ. 1. Дифрактограммы двух типичных глинистых фракций из донных осадков Пенсильвании. На кривых сверху вниз указан способ обработки проб (насыщение Mg, обработка гликолем, нагревание до 300°, насыщение калием).

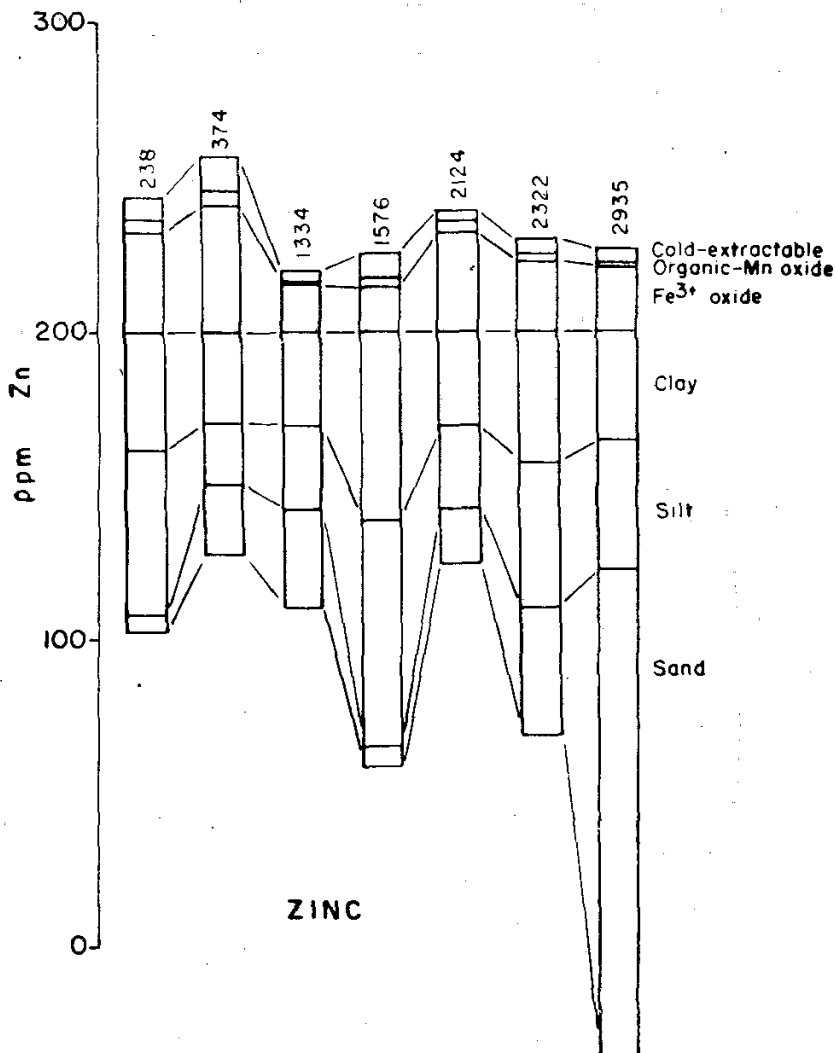
в свою очередь осаждались из суспензии при помощи центрифугирования. Полученный материал также высушивался при 110° С и взвешивался.

6. Часть глинистой фракции насыщалась магнием путем повторных обработок 1 М раствором $MgCl_2$; пробы помещались на предметное стекло методом Гиббса [5], а затем производился дифрактометрический анализ. Кроме того, с тех же препаратов снимались дифрактограммы после обработки гликолем методом Брантона [1] и повторно после прогрева их при 300° С в течение ночи.

7. Песчаная, шламовая и глинистая фракции анализировались спектральным методом на Al, Ca, Fe, Mg, Mn, Co, Cr, Cu, Ni, V и Zn, описанным ниже в разделе «Метод спектрального анализа».

Дифрактограммы типичных глин приведены на фиг. 1. Обычно глинистые фракции представлены смесями каолинита (пик 7 Å), иллита (пик 10 Å) и вермикулита с небольшими количествами хлорита в некоторых пробах. Присутствие вермикулита доказывается наличием пика 14 Å, который не расширяется

после обработки гликолем и исчезает с одновременным смещением в область меньших значений межплоскостных расстояний при нагревании. Такое поведение подтверждается на примере нескольких проб, в которых большая часть минерала с пиком 14 Å исчезает при насыщении их калием. Некоторые вермикулиты переходят в фазу с пиком 10 Å и, очевидно, представлены нормальным вермикулитом, однако другие только частично претерпевают это изменение и, вероятно, представлены Al-переслаивающейся разностью [8]. Такие глины характерны для почв Пенсильвании и аналогичных климатических регионов. Вермикулиты — трехслойные глины, подобные слюдам и монтмориллонитам, но заряд слоя (и компенсирующих межслоевых катионов) у них промежуточный между глинами и слюдами. Они образуются при выветривании слюд и могут быть получены путем синтеза из растворов [2]. Обычно они характеризуются большой катионно-обменной емкостью, причем Mg и Ca выступают в роли нормальных обменных катионов, в противоположность необменному калию в слюдах.

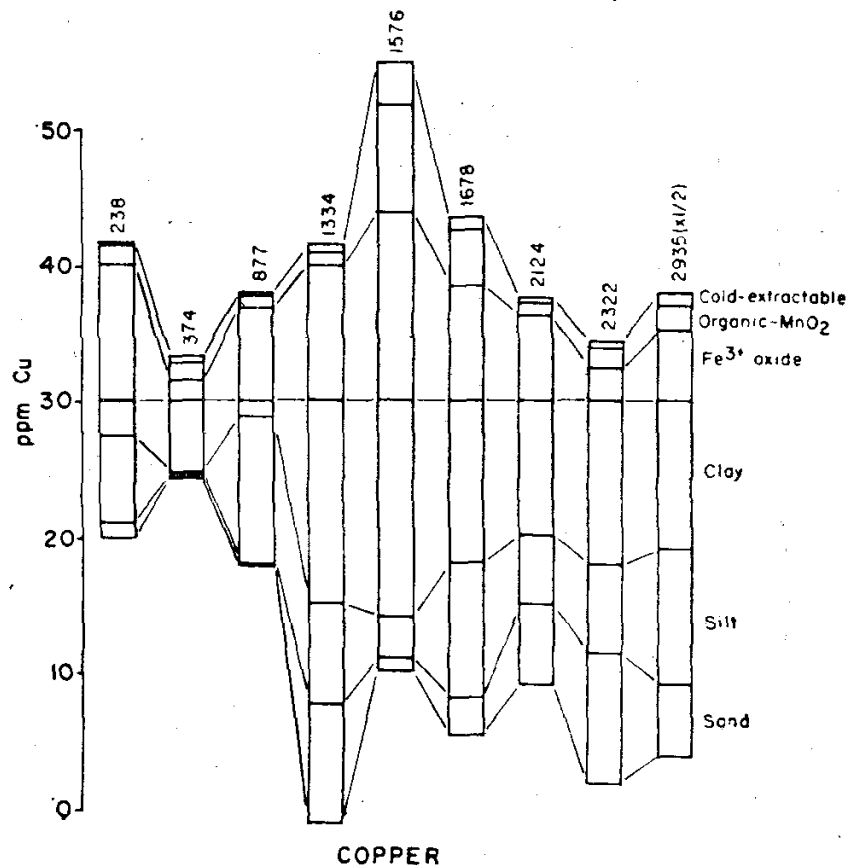


ФИГ. 2. Распределение цинка по фазам донных осадков. Содержания приведены в соответствии с количеством цинка в валовой пробе.

Важная роль вермикулита для настоящего исследования заключается в наличии значительных количеств Mg и Fe³⁺ в октаэдрическом слое вермикулита и их высокой обменной емкости. Представляется вероятным, что большая часть переходных элементов, установленных в глинистой фракции, приурочена к вермикулитам и что часть «холодных экстрагенов» также заключена в них.

Типичные результаты исследования по распределению элементов приведены на фиг. 2—4. Для построения диаграмм содержания металлов в каждой из шести фаз были пересчитаны на содержание их в исходной пробе с учетом веса глинистой, шламовой и песчаной фракций и веса исходной пробы. Шкала на указанных диаграммах приведена для сравнения.

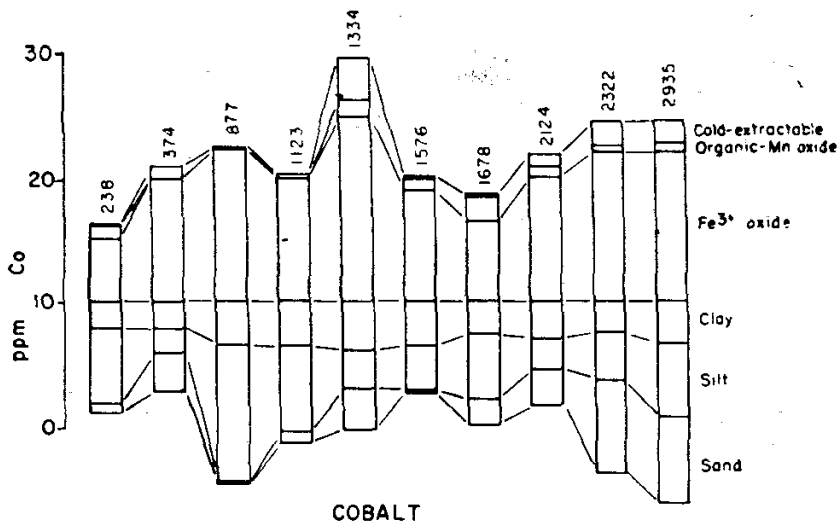
Значительные количества цинка в большинстве проб содержатся в глинистой, шламовой и песчаной фракциях, а также в окислах железа, но наибольшие изменения содержания цинка характерны для песчаной и шламовой фракций. При изучении песчаной фракции проб с высоким содержанием цинка (2322, 2935



ФИГ. 3. Распределение меди по фазам в некоторых донных осадках.

на фиг. 2) установлено наличие в этих пробах значительных количеств темноцветных минералов (роговая обманка, биотит) и окислов железа (магнетит-ильменит и продукты их выветривания), а также относительно большой доли песка по сравнению со шламом и глинами. Глинистая фракция пробы 1576, в которой сконцентрирована значительная доля цинка, содержит относительно много вермикулита по сравнению с другими пробами.

При рассмотрении распределения меди (фиг. 3) оказалось, что в глинистой и железист-



ФИГ. 4. Распределение кобальта по фазам в некоторых донных осадках.

стой (окислы) фракциях обычно сконцентрирована большая часть меди, а песчаная фракция отличается наибольшей изменчивостью содержания меди. Поведение никеля (не показано) аналогично поведению меди и также отличается большой изменчивостью его содержания в песчаной фракции. Однако роль шламовой фракции здесь более существенна, чем для меди. Фракция окислов железа включает весьма значительную долю кобальта (фиг. 4), содержание которого в песчаной и шламовой фракциях изменчиво.

На основе приведенных выше результатов представляется, что цинк, медь, никель и кобальт концентрируются преимущественно в гидроокислах железа, глинистой фракции, темноцветных минералах и железо-титанистых окислах, содержащихся в песчаной и шламовой фракциях. Хотя «обменный металл» (холодный экстрагент) может быть важным индикатором гидроморфных аномалий на некоторых участках и, следовательно, поисковым признаком на руду, он составляет лишь незначительную долю общего содержания металла. Органическая фракция, по-видимому, не является важным концентратом для какого-либо из элементов, хотя небольшие количества их установлены в этой фракции для целого ряда проб. В глинистых фракциях главный минерал-носитель, вероятно, представлен вермикулитом, поскольку рассматриваемые элементы скорее будут замещать железо и магний в вермикулите, чем концентрироваться в каолините или иллите в значительных количествах. Все важные фазы, содержащие значительные количества исследуемых микроэлементов, в свою очередь содержат железо, а большинство из них — также магний, тогда как некоторые (вермикулит, биотит) обогащены алюминием.

В первом приближении можно ожидать, что пробы, характеризующие фон и содержащие повышенные количества железа — магния, будут отличаться повышенными концентрациями рассматриваемых микроэлементов. Следовательно, представление о величинах содержаний главных элементов могло бы помочь при корректировке изменчивости, обусловленной разными количествами главных минералов в отдельных пробах. Это было бы реально, если бы отношение микроэлемента к железу или магнию оставалось относительно постоянным в разных фракциях и участках. Однако ожидаются некоторые колебания в величине данного отношения, поэтому представление о величинах содержаний главных элементов позволит лишь частично корректировать изменчивость фоновых значений.

Таблица Ia

Аппаратура и условия съемки

Электрод с пробой	Графит высокой частоты «Нейшнл» L4000, диаметр 3/16 дюйма
Противоэлектрод	Графит высокой чистоты, диаметр 1/8 дюйма, заострен в карандашной точилке
Загрузка электрода, мг	30
Расстояние между электродами, мм	4
Сила тока, А	17
Расход газа через сопло, л/мин	6
Состав газа	86% аргона, 14% кислорода
Экспозиция	Проба сжигалась полностью, приблизительно 2 мин
Эмиссионный спектрометр	RCI с обратной линейной дисперсией 4 Å/мм и последовательным печатающим устройством, считывающим отношения напряжений ($V_{\text{неизвестное}}/V_{\text{внутренний стандарт}}$)
Входная щель, мкм	25
Выходная щель, мкм	50, за исключением щели в 75 мкм для Zn 2139, Lu 2911 и Ge 2651

Таблица Ib

Пары аналитических линий

Внутренний стандарт, Å	Аналитическая линия, Å
Lu 2911,39	Mn 2576,10 Fe 2755,74 V 3102,30
Ge 2651,48	Zn 2138,56
	Al 2373,13 Pb 2833,06 Cu 3273,96 Ag 3382,89 Co 3453,50 Ni 3515,05 Cr 4254,35 Ca 4302,53 Mg 4703,02

Таблица II

Воспроизводимость эмиссионного спектрометра с прямым отсчетом, основанная на повторных анализах пробы 3181

Элемент	Среднее	Стандартное отклонение	Коэффициент вариации, %
Co	32 млн ⁻¹	2,3 млн ⁻¹	7,2
Cr	427 млн ⁻¹	31,0 млн ⁻¹	7,2
Cu	121 млн ⁻¹	5,4 млн ⁻¹	4,5
Mn	1209 млн ⁻¹	50,0 млн ⁻¹	4,2
Ni	152 млн ⁻¹	15,7 млн ⁻¹	10,0
V	187 млн ⁻¹	17,4 млн ⁻¹	9,3
Zn	> 400 млн ⁻¹		
Al ₂ O ₃	18,3%	0,85%	4,6
CaO	3,27%	0,32%	9,8
Fe ₂ O ₃	9,95%	1,30%	13,0
MgO	3,68%	0,34%	9,2
N=19			

МЕТОД СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА

Для использования данных по главным элементам при установлении фоновых значений микроэлементов, необходима максимальная степень эффективности при их получении. Прямо отсчитывающая эмиссионная спектральная аппаратура с дугой постоянного тока удобна для одновременного определения содержания и главных и второстепенных элементов. Применялись два варианта такого метода. При первом определялись содержания Zn, Cu, Ni, Co, Cr, V, Mn и Fe примерно в 1800 пробах из донных осадков с использованием приемов, описанных Кейтом, Крафтом и Дальбергом [7].

Совсем недавно этот метод был усовершенствован, что позволило определять также Mg, Ca и Al. Первоначальные трудности, связанные с плохой воспроизводимостью для некоторых проб, были преодолены путем дальнейшего их измельчения от фракции менее 0,25 мм до фракции менее 0,044 мм при помощи шаровой мельницы, изготовленной из керамического материала с высоким содержанием глинозема. Кроме того, пробы предварительно прокаливались при температуре 750° С в течение 1 ч, чтобы исключить возможность выброса анализируемых проб с высоким содержанием глины из электродов, обусловленный испарением воды на начальных стадиях зажигания дуги. При этом было показано, что проводимое ранее прокаливание при температуре 600° С недостаточно для некоторых глинистых минералов, включая вермикулит. После прокаливания материал пробы, внутренний стандарт и графит в соотношении 1:1:2 перемешивались на смесителе Wig-L-Bug в течение 15 с. Внутренний стандарт представляет собой Na₂B₄O₇, содер-

жащий 0,75% GeO₂ и 0,10% Lu₂O₃, который плавляли при 1000° С, измельчали и пропускали через нейлоновое сито с размером ячейки 0,07 мм. Применяемый графит — порошок «Нейшнл-Карбон SP-2». До зажигания дуги электроды, содержащие материал проб, выдерживали в печи при температуре 250° С по крайней мере в течение ночи. Основные моменты применяемой аналитической методики приведены в табл. I. Воспроизводимость анализа показана в табл. II.

Эталоны (на Zn, Cu, Ni, Co, Cr и V) первоначально изготавливались путем добавления известных количеств окислов в металлокерамическую смесь, соответствующую среднему составу донных осадков и приготовленную из «предположительно чистых» веществ. В случае марганца и железа использовались имеющиеся эталоны пород и искусственные смеси из них. Применение искусственных эталонов никогда не приводило к удовлетворительным результатам. Поэтому эталоны пород и изготовленные из них смеси использовались также и для определения содержаний микроэлементов. Это давало удовлетворительные результаты для всех элементов, кроме цинка, содержание которого во многих пробах колебалось в пределах 200—600 млн⁻¹ и превышало его содержание в имеющихся эталонах. Поэтому одна проба донных осадков была проанализирована на цинк атомно-абсорбционным методом и найденное содержание (400 млн⁻¹) послужило эталоном для определения высоких содержаний. Значения содержаний цинка, превышающие 400 млн⁻¹, практически неопределимы данным эмиссионным спектральным методом вследствие мешающих эффектов самопоглощения; цинк в пробах с такими содержаниями определялся на атомно-абсорбционном спектрометре.

Применявшиеся эталоны представляли собой шесть новых проб Геологической службы США, эталоны G-1 и W-1, а также GR, GR и BR из Нанси, Франция, и T-1 из Танганьики. В этих пробах были определены не все микроэлементы, поэтому использовались только те значения, которые, по нашему мнению, надежны.

При обработке спектральных данных считалось, что отношение выходных напряжений спектрометра для пробы с неизвестным содержанием и для внутреннего стандарта связано с этим неизвестным содержанием линейной зависимостью вида $y = mx + b$. В приведенном уравнении b представляет фон, в который в нашем случае не вносились поправки, а m — наклон линии, определяемый при помощи всех имеющихся стандартов и особенно при помощи

стандарта с наиболее высоким значением содержания исследуемого элемента. В нашем исследовании кварц гранита СН из Франции считался холостым стандартом. Эталоны с высокими содержаниями элементов указаны в табл. III.

Таблица III

Пробы, использованные для построения верхних участков рабочих кривых

V	W-1 (250 млн ⁻¹)
Co	W-1 (44 млн ⁻¹)
Ni	Смеси РСС-1 (2440 млн ⁻¹) и СН (холостая)
Cu	СР (400 млн ⁻¹) и W-1 (110 млн ⁻¹)
Cr	Смеси РСС-1 (2870 млн ⁻¹) и СН (холостая)
Zn	T-1 (160 млн ⁻¹) и донные осадки (400 млн ⁻¹)

ИССЛЕДОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УРАВНЕНИЙ РЕГРЕССИИ

Для проверки такого общего подхода мы вычислили уравнения регрессии следующего вида [10]:

$$y_0 = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_kX_k \dots,$$

где y — оцениваемое значение зависимого переменного (Zn, Cu, Ni, Co, Cr, V), b_n, \dots, b_k — коэффициенты регрессии, вычисленные по данным пробы методом наименьших квадратов, а $X_1 \dots X_k$ — значения независимых переменных (Fe, Mn, Ca, Al, Mg; относительная доля различных типов пород в дренируемом бассейне в процентах; содержание фракции менее 44 мкм в процентах и др.). При вычислении регрессии использовались логарифмы содержания, так как распределение микроэлементов характеризуется примерно логарифмически нормальным законом. Роуз с соавторами [10] описал эту процедуру более подробно.

При первоначальном проведении такого исследования уравнение регрессии определялось методом наименьших квадратов по данным опробования донных осадков из 460 дренируемых бассейнов («ячеек») в юго-восточной части Пенсильвании [7]. Независимыми переменными служили Fe, Mn, относительная доля каждой из 20 типов пород в дренируемом бассейне и характер рельефа, выраженный разницей высот между самой высокой и самой низкой точками рельефа в дренируемом бассейне. В каждой ячейке было взято по крайней мере три пробы из донных осадков, в среднем в каждой ячейке по шесть проб, и таким образом была

опробована территория общей площадью около 38 кв. км. Данные по химическому составу проб ячейки переводились в логарифмы и вычислялись средние значения, а затем независимые переменные вводились в виде логарифмов соответствующих значений. Коэффициенты регрессии вычислялись для каждого микроэлемента поэтапно [4], так что наиболее значимые коэффициенты определялись в первую очередь, и вычисление прекращалось, когда ни одна из неиспользованных независимых переменных не могла значительно улучшить степень соответствия регрессии (при 95% доверительном уровне). В регрессию включались только те независимые переменные, которые оказывались значимыми в ходе проведения этой процедуры.

Таблица IV

Результаты анализа при использовании регрессии 460 дренируемых бассейнов в юго-восточной части Пенсильвании

Элемент	Дисперсия, определенная по уравнению регрессии, %		Число значимых переменных ¹	Ранг Fe ²
	При введении только Fe	При введении всех переменных		
log Zn	20	36	7	3
log Cu	31	51	10	1
log Ni	25	49	11	1
log Co	9	20	5	1
log Cr	25	41	6	1
log V	62	70	11	1

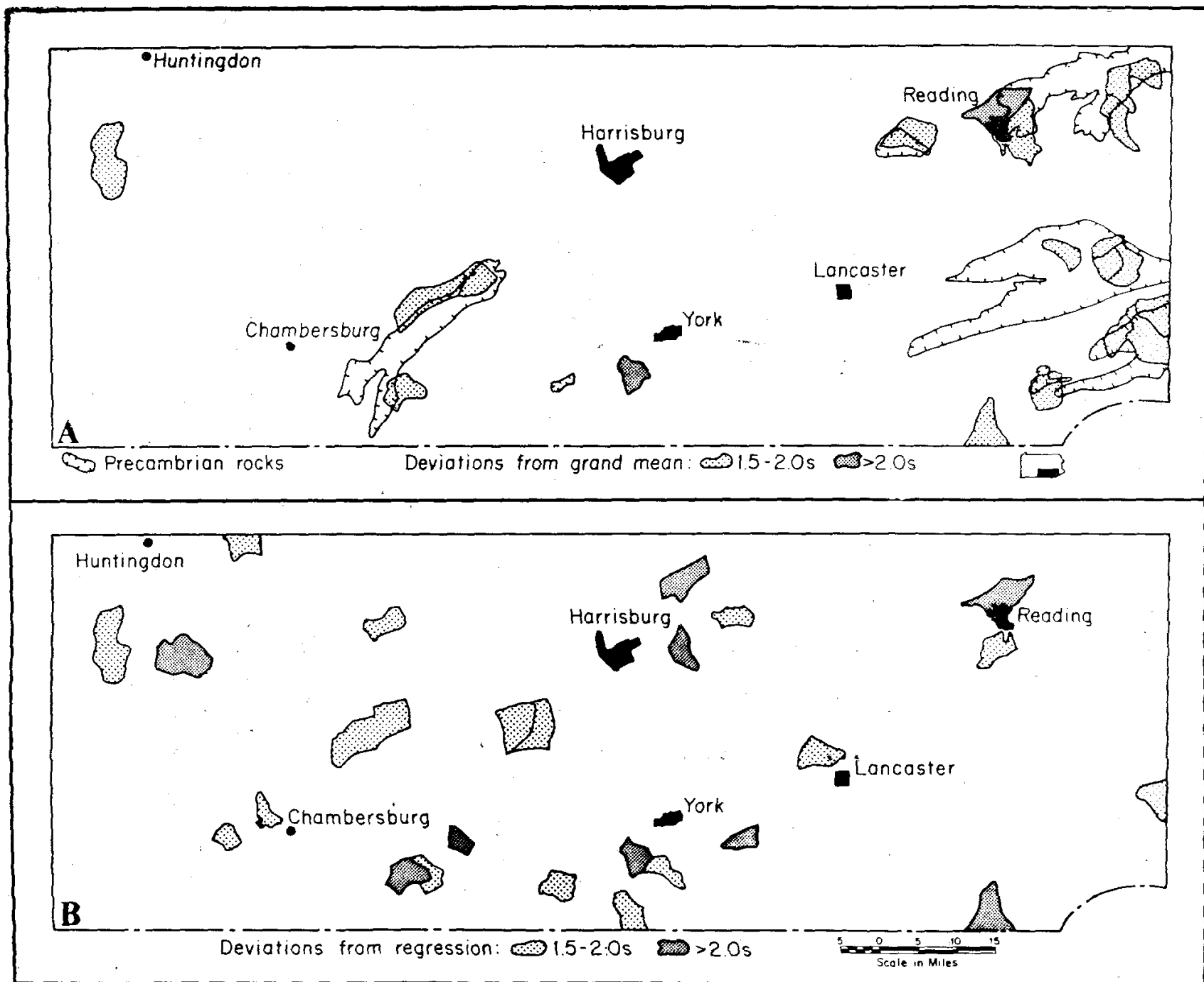
К независимым переменным относятся Fe, Mn, характер рельефа и 21 тип пород.

¹ Число переменных, которые оказались значимыми в соответствии с возрастающим порядком регрессии.

² Ранг железа среди значимых переменных в выражении коэффициента частной корреляции.

Табл. IV показывает долю дисперсии, обусловленную каждой зависимой переменной при использовании окончательного уравнения регрессии, и число переменных, включенных в данное уравнение. Она показывает также дисперсию, вызываемую только одним железом, и ранжировку железа среди значимых переменных, установленную при помощи коэффициента частной корреляции.

В уравнение регрессии включена значительная часть дисперсии для всех элементов. Детальное рассмотрение данных свидетельствует о том, что это справедливо даже для кобальта. Подробное сопоставление аномалий по отношению к регрессии и сравнение с необработанными данными показывает, что некоторые новые аномалии, установленные при помощи



ФИГ. 5. Аномалии цинка.

А. Аномалии цинка, установленные по отношению к среднему содержанию цинка на основании необработанных данных по донным осадкам из 460 дренируемых бассейнов в Пенсильвании. Отмечается группировка аномалий в области развития докембрийских пород. Б. Аномалии цинка, установленные на основании уравнения регрессии, в которое введены содержания Fe, Mn и различные типы пород. Под фиг. 5, А и 5, Б указаны отклонения от среднего и регрессии соответственно.

регрессии, вероятно, указывают на существование локальных источников кобальта естественного или искусственного происхождения [9]. К тому же в соответствии с окончательным уравнением регрессии само железо обуславливает обычно от половины до двух третей дисперсии, и железо является наиболее значимым переменным в выражении коэффициента частной корреляции. Другими словами, если по экономическим соображениям может быть измерена только одна из независимых переменных в качестве предсказателя зависимых переменных, то железо пригодно в большей мере, чем марганец или любой из типов породы. В противоположность этому марганец оказался зна-

чимым только для двух микроэлементов и играет гораздо меньшую роль в регрессии по сравнению с железом. Поскольку для измерения соотношений литологических разновидностей пород в каждом дренируемом бассейне необходимы детальная геологическая карта и значительное время, возможность использования независимой переменной, которая может быть легко количественно определена в самой пробе, представляет собой важное достижение.

На фиг. 5 показаны изменения в ячейках аномалий, установленные для цинка в результате использования уравнения регрессии (при введении и литологических и химических переменных) и сравнения с необработанными дан-

ными. На этих картах дренируемые бассейны считаются аномальными, если они отличаются от среднего или регрессии больше чем на 1,5 стандартного отклонения или стандартной ошибки соответственно. По необработанным данным хорошо проявленное сосредоточие аномалий устанавливается в поле развития докембрийских пород. В противоположность этому при обработке данных с использованием регрессии обнаруживаются некоторые аномалии в палеозойских известняках. Такие аномалии, по видимому, являются благоприятными участками для локализации цинковых месторождений апалачского типа, как, например, во Фрайденвилле, штат Пенсильвания, хотя некоторые из них могут представлять собой загрязненные промышленностью площади. На карте, составленной с использованием регрессии, к западу от Ланкастера выделяется аномальная ячейка, на территории которой находится давно заброшенный рудник Бэмфорд. Эта ячейка не была отмечена на карте, построенной по необработанным данным.

Вторая проверка данной методики производилась с использованием усовершенствованной и обобщенной спектральной методики, описанной в настоящей статье. Таким образом была проанализирована целая серия из 76 проб, взятых около Аллентаун-Бетлехем. Были также получены данные по типам пород в каждом дренируемом бассейне и по относительной доле фракции менее 44 мкм в донных осадках. Вычислены уравнения регрессии для цинка, меди, никеля и кобальта с использованием содержания всех главных элементов, типов пород и доли фракции менее 44 мкм в качестве независимых переменных (после преобразования в логарифмы), а также с использованием только данных по химизму и содержанию фракции менее 44 мкм. Результаты приведены в табл. V.

При объяснении дисперсии цинка химические переменные приводят почти к тем же результатам, что и сочетание переменных по химизму и типам пород. Магний, встречающийся, вероятно, в виде вермикулита и невыветрелых темноцветных минералов, — наиболее значимая переменная; марганец, алюминий и кальций также значимы. В более полное уравнение входит только один тип пород.

Содержание железа также оказывается наиболее важной переменной по отношению к содержанию никеля и кобальта, видимо, вследствие причин, описанных выше. Кальций встречается преимущественно в виде карбонатов.

Когда количество кальция в пробах превышает первые десятые доли процента, он значительно влияет на содержание всех четырех элементов.

Таблица V

Результаты анализа при использовании регрессии, район Бетлехем, Пенсильвания

Зависимые элементы	Тип переменной	Дисперсия, % в соответствии с уравнением регрессии	Независимые переменные регрессии
log Zn	Только химизм	29	Mg, Mn (-), Al, Ca
log Zn	Химизм и литология	34	Mg, 19 (-), Mn (-), Al
log Cu	Только химизм	18	Ca, % — менее 44 мкм
log Cu	Химизм и литология	31	19 (-), Ca, 18, % — менее 44 мкм
log Ni	Только химизм	36	Fe, % — менее 44 мкм, Ca
log Ni	Химизм и литология	61	Fe, 14 (-), 17, % — менее 44 мкм, Ca
log Co	Только химизм	34	Fe, Ca
log Co	Химизм и литология	53	Fe, 14 (-), 17, 12 (-), Ca, Al

76 проб по донным осадкам.

(-) означает отрицательный коэффициент переменной.

Числа обозначают доли следующих типов пород:

Переменная: 12 — докембрийский гнейс Моравиан-Хайтс;

14 — докембрийский гранито-гнейс Байрэм;

17 — кембрийская формация Аллентаун;

18 — ордовикская формация Бикмонтаун;

19 — ордовикская формация Джэксонбург;

% — менее 44 мкм — содержание фракции менее 44 мкм в процентах.

Предполагается, что часть этих элементов находится в карбонате или связана с ним каким-то геохимическим процессом.

Сравнение дисперсии, обусловленной химическими данными, с дисперсией, вызванной сочетанием данных по химическому составу и типам пород, показывает, что введение информации по типам пород всегда приводит к некоторому улучшению получаемых результатов. Однако, основываясь на ранее упомянутом детальном исследовании распределения кобальта в более широких масштабах, установлено, что даже 18%-ная дисперсия содержания меди, обусловленная химическими переменными, может привести к значительным улучшениям в интерпретации.

Подсчет аномалий (разницы между истинным содержанием металла и содержанием металла, вычисленным при помощи регрессии) для этого четырехугольника не приводит к каким-либо различиям в очертаниях аномалий, которые четко связаны с рудой, как это устанавливается при исследованиях в более широких масштабах. Однако восемь проб в северной части четырехугольника (не использованные

при вычислении коэффициентов регрессии), по-видимому, отражают загрязнение, связанное с близлежащим предприятием по выплавке цинка. При использовании значений из уравнения регрессии (только химические данные) для вычисления фона девятая проба на данном участке оказывается аномальной, свидетельствуя, что даже для столь ограниченной группы проб применяемая методика позволяет улучшать разбраковку аномалий.

ВЫВОДЫ

Исследование распределения микроэлементов, описываемое в настоящей статье, а также общие геохимические положения наводят на мысль о том, что содержание перемещенных микроэлементов в фоновых участках донных осадков зависит от содержания железа и магния. Кроме того, большие колебания содержания цинка и других металлов в песчаной и шламовой фракциях донных осадков означают, что отсеивание грубозернистой фракции может значительно уменьшить дисперсию фона, а это приводит к обнаружению менее интенсивных аномалий.]

Зависимость микроэлементов от главных компонентов указывает на целесообразность применения метода регрессии как способа установления фоновых значений для различных геологических и геохимических факторов. Два случая, рассмотренные в данной статье, показывают, что эта процедура целесообразна и может приводить к улучшению интерпретации. Использование данных и по химическому составу и по типам пород позволяет получить наилучшее уравнение регрессии, но использование только главных элементов также может дать хорошие результаты. Данные по главным элементам могут быть эффективно получены одновременно с данными по микроэлементам при использовании эмиссионной спектральной установки с прямым отсчетом, описанной в настоящей статье.

Применяемый нами метод, по-видимому, наиболее пригоден для исследования обширных площадей, когда невозможно рассматривать каждую пробу в отдельности; внимание концентрируется в этом случае на аномальных по отношению к фоновым значениям, вычисленным по уравнениям регрессии. Кроме того, целесообразно изучить по крайней мере интенсивные аномалии, установленные по необработанным данным, поскольку в некоторых случаях месторождения могут сопровождаться вы-

сокими содержаниями тех или иных главных элементов. Такие аномалии можно распознать, применяя регрессию. При исследовании обширных территорий ситуация подобного рода менее вероятна вследствие разнообразия одновременно действующих факторов.

Очевидно, простой метод, описанный в этой статье, представляет собой только начало в отношении получения и использования детального представления об аномалиях в донных осадках, необходимого для оптимальной корректировки фоновых значений. Взаимозависимость между главными элементами и микроэлементами явно изменяется при переходе от одного типа пород или физико-химических условий водного потока к другим. Введение дополнительных факторов, таких, как рН и Eh водного потока или донных осадков, а также соотношений элементов или их более сложных функций и физических факторов привело бы к значительно более точному предсказанию фоновых значений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Brunton G. D., Vapor Pressure Glycolation of Oriented Clay Minerals, *Am. Mineralogist*, 40, 124—126, 1955.
2. Barshad I., Kishk F. M., Chemical Composition of Soil Vermiculite Clays as Related to Their Genesis, *Contr. Mineral. and Petrol.*, 24, 136—155, 1969.
3. Dahlberg E. C., A Multivariate Study of Some Aspects of Trace Metals in Stream Sediments as Guides to Locating Mineral Deposits, Ph.D. thesis, Pennsylvania State University, 163, 1968.
4. Efroymsen M. A., Multiple Regression Analysis, in *Mathematical Methods for Digital Computers*, edited by Ralston and Wilf, John Wiley and Sons, New York, 1965.
5. Gibbs R. J., Error Due to Segregation in Quantitative Clay Mineral X-Ray Diffraction Mounting Techniques, *Am. Mineralogist*, 50, 741—751, 1965.
6. Jackson M. L., *Soil Chemical Analysis*, advanced course, 2nd printing, privately printed, Madison, Wisconsin, 31—60, 1956.
7. Keith M. L., Cruft E. F., Dahlberg E. C., Trace Metals in Stream Sediment of Southeastern Pennsylvania, Part 1, *Geochemical prospecting guide based on regional distribution of zinc, copper, nickel, cobalt, chromium and vanadium*, Bull. 82, Earth and Mineral Sciences Expt. Sta., Pennsylvania State University, University Park, Pa., 14, 1967.
8. Rich C. T., Obenshain S. S., Chemical and Clay Mineral Properties of Soil Derived from Muscovite Schist, *Proc. Soil. Sci. Soc. Amer.*, 19, 334—339, 1955.
9. Rose A. W., Trace Metals in Stream Sediment of Southeastern Pennsylvania, Parts II and III, manuscript, 1971.
10. Rose A. W., Dahlberg E. C., Keith M. L., A Multiple Regression Technique for Adjusting Background Values in Stream Sediment Geochemistry, *Econ. Geol.*, 65, 156—165, 1970.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	5
Предисловие к английскому изданию	7
I НАЗЕМНЫЕ ГЕОХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОИСКОВ	9
К. Лепелтье. Геохимические поиски в программе развития ООН. <i>Перевод М. Ф. Кузина</i>	10
И. Никол. Перспективы применения геохимических методов поисков в Канаде. <i>Перевод М. Ф. Кузина</i>	15
Р. Дж. Аллан, Е. Х. У. Хорнбрук. Оценочные геохимические исследования в районе многолетней мерзлоты, Северо-Западные территории, Канада. <i>Перевод М. Ф. Кузина</i>	23
Дж. Дж. Бараксо, Б. А. Брэдшоу. Поверхностное разубоживание и выщелачивание молибдена. <i>Перевод В. А. Макрыгиной</i>	41
С. Х. У. Бовье, Т. К. Болл, Д. Остл. Геохимические методы при поисках скрытых урановых месторождений. <i>Перевод Л. А. Леонтьевой</i>	49
Ф. Кашо-Эррейя, Д. П. Пруэ. Использование металлоидов (мышьяк, фосфор, фтор) как поисковых признаков скарново-вольфрамовых месторождений в Пиренеях. <i>Перевод Л. А. Леонтьевой</i>	60
М. Деллаглио. Сравнение гидрогеохимического метода и метода донных осадков при поисках ртути. <i>Перевод М. Ф. Кузина</i>	64
Г. Х. Фридрих, У. Л. Плюгер. Геохимические поиски баритовых и флюоритовых месторождений. <i>Перевод М. Ф. Кузина</i>	71
Р. Ф. Хорснейл, И. Л. Эллиот. Влияние природных условий на вторичное рассеяние молибдена и меди в западной Канаде. <i>Перевод В. А. Макрыгиной</i>	77
К. Ф. Г. Хоскинз. Проблемы применения геохимических методов поисков в Корнуэлле, Англия. <i>Перевод В. М. Макагона</i>	90
Ф. Р. Сигел. Морские геохимические поиски — настоящие и будущие. <i>Перевод М. Ф. Кузина</i>	108
Ф. М. Смит. Геохимические поиски в горных районах развития сложных ледниковых отложений, медный пояс Уайтхорс, Юкон. <i>Перевод М. Ф. Кузина</i>	116 126
П. Б. Трост, Р. Е. Бискве. Дифференциация паров и ионов ртути в почвах. <i>Перевод М. Ф. Кузина</i>	
Д. Брабек, В. М. Х. Уайт. Распределение меди и цинка в породах батолита Гуичон-Крик, Британская Колумбия. <i>Перевод В. А. Макрыгиной</i>	129
Э. М. Камерон, Г. Сиддли, С. С. Дархэм. Изучение распределения рудных элементов в породах для оценки рудоносности. Никель, медь, кобальт и сера в ультраосновных породах Канадского щита. <i>Перевод В. А. Макагона</i>	138
Р. Дарлинг. Предварительное изучение распределения редких и рассеянных элементов в биотите из кварцевых монзонитов, ассоциирующих с контактово-метасоматическими вольфрамо-молибденово-медными рудами, Калифорния, США. <i>Перевод Л. А. Леонтьевой</i>	161
Б. М. Хамиль, М. П. Накovski. Распределение микроэлементов в акцессорном магнетите из интрузивов кварцевых монзонитов и его связь с сульфидной минерализацией в провинции Бассейнов и Хребтов, штаты Юта и Невада (предварительное сообщение). <i>Перевод В. В. Герасимовского</i>	168
Д. М. Хаузен, П. Ф. Керр. Дифрактометрические методы оценки изменения силикатов калия при образовании порфировых руд. <i>Перевод В. В. Герасимовского</i>	172
В. Р. Хесп. Зависимость содержания олова в гранитных породах от их химического и минерального состава. <i>Перевод В. М. Макагона</i>	180
Б. Наприс. Эндогенные ореолы рассеяния вокруг сульфидного месторождения Рудтжебекен в районе Адак, северная Швеция. <i>Перевод В. В. Герасимовского</i>	196
В. П. Снарс. Ртуть в рудах месторождений цветных металлов и золота провинции Квебек. <i>Перевод В. В. Герасимовского</i>	214
	323

II. ИЗОТОПНЫЕ МЕТОДЫ ПРИ ГЕОХИМИЧЕСКИХ ПОИСКАХ

Е. Е. А н ж д и н о, Е. Д. Г о б е л, Т. К. У о г. Использование сульфидов и изотопов свинца при поисках месторождений в палеозойских породах центральных штатов США. <i>Перевод В. М. Макагона</i>	224
Р. С. К э н н о н, А. П. П и р с, Д ж. К. А н т в е й л е р. Применение изотопов свинца при поисках месторождений полезных ископаемых. <i>Перевод В. М. Макагона</i>	228
М. Л. Д ж е н с е н. Значение стабильных изотопов при геохимических поисках. <i>Перевод В. М. Макагона</i>	237
М. Ш и м а, Х. Г. Т о д. Применение стабильных изотопов при геохимических поисках. <i>Перевод В. М. Макагона</i>	242

III. АЭРОГЕОХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОИСКОВ

Р. Б е н н е т. Поиски гидротермальной минерализации аэрогаммаспектрометрическим методом. <i>Перевод П. П. Смолина</i>	248
Б. К у к, Д ж. Д у в а л, Д ж. А. С. А д а м с. Успехи в калибровке аэрогаммаспектрометров для целей геохимических поисков. <i>Перевод П. П. Смолина</i>	253
А. Г. Д а р н л и, Р. Л. Г р е с т и. Аэрогаммаспектрометрическое картирование. <i>Перевод П. П. Смолина</i> .	269
О. В е й с с. Аэрогеохимические поиски. <i>Перевод П. П. Смолина</i>	280

V. СТАТИСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ГЕОХИМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

Б. Б ё л ь в и к е н. Статистический подход к проблеме интерпретации данных при геохимических поисках. <i>Перевод В. В. Герасимовского</i>	298
Е. М. К а м е р о н, В. Р. А. Б а р а г а р. Распределение рудных элементов в породах для оценки потенциальной рудоносности (Частотное распределение меди в вулканических породах группы Коппермай-Ривер и Йеллоунайф, Северо-Западные территории Канады). <i>Перевод В. В. Герасимовского</i>	302
Е. К. Д а л ь б е р г. Алгоритмическое развитие программы геохимических поисков. <i>Перевод В. В. Герасимовского</i>	309
А. В. Р о у з, Н. Х. С у р. Содержание главных элементов как фактор, определяющий колебание фоновых содержаний элементов в донных осадках. <i>Перевод В. В. Герасимовского</i>	313

УВАЖАЕМЫЙ ЧИТАТЕЛЬ!

Ваши замечания о содержании книги, ее оформлении, качестве перевода и другие просим присылать по адресу: 129820, Москва, И-110, ГСП, 1-й Рижский пер., 2, издательство «Мир».

«НАУКИ О ЗЕМЛЕ»

т. 55

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ПОИСКИ

Редактор Г. П. Романович

Художник А. Д. Смеляков

Художественный редактор Ю. С. Урманчиев

Технический редактор Н. А. Иовлева

Сдано в набор 15/VI 1973 г. Подписано к печати 17/VIII 1973 г. Бумага тип. № 2 $84 \times 1081/16 = 10,25$ бум. л. 34,44 усл. печ. л. Уч.-изд. л. 37,68. Изд. № 5/6932

Цена 4 р. 17 к. Зак. 01073

ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР»

Москва, 1-й Рижский пер., 2

Ордена Трудового Красного знамени

Московская типография № 7 «Искра революции»

Союзполиграфпрома при Государственном комитете

Совета Министров СССР по делам издательств,

полиграфии и книжной торговли

Москва, К-1, Трехпрудный пер., 9