

291  
А. Н. ДУДАРЕВ,  
В. И. СОТНИКОВ,  
А. И. ВАСИЛЬЕВА



# МОБИЛИЗАЦИЯ РУДНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ТЕРМОГРАДИЕНТНЫХ ПОЛЯХ

АКАДЕМИЯ НАУК СССР  
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ  
ТРУДЫ ИНСТИТУТА ГЕОЛОГИИ И ГЕОФИЗИКИ

Выпуск 291

А. Н. ДУДАРЕВ, В. И. СОТНИКОВ, А. И. БАСИЛЬЕВА

**МОБИЛИЗАЦИЯ  
РУДНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ  
В ТЕРМОГРАДИЕНТНЫХ ПОЛЯХ  
(По данным крупномасштабного  
эксперимента)**

Ответственный редактор  
д-р геол.-мин. наук *В. Н. Шаронов*



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»  
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ  
Новосибирск · 1976

В книге изложены результаты геологических, химико-минералогических и статистических методов экспериментального изучения влияния неоднородных температурных полей на поведение рудных элементов горных пород при длительном нагревании крупных блоков горных масс в условиях естественного залегания. При этом в рыхлых или массивных породах искусственно создавались многозональные термоконвекционные флюидные системы неоднородного внутреннего строения, что приводило к существенному перераспределению в них рассеянных рудных компонентов.

Материалы могут быть использованы для разработки новых прогнозно-поисковых признаков в практической геологии, а также в теоретической — при решении вопросов зональности и генезиса эндогенных рудных месторождений.

Идея моделирования сложных эндогенных геологических процессов в условиях максимального приближения к природным не нова. Геологические аналоги давно исследуются в металлургии, петрургии, при подземной газификации твердого топлива и т. д. Наиболее полное и эффективное воплощение эта идея нашла при изучении районов современной гидротермальной и вулканической деятельности и отчасти в инженерной геологии.

Большое место в моделировании эндогенных палеогеологических процессов в лабораторных условиях отводится в настоящее время различным прессовым и автоклавным методам, методические и технологические особенности которых не позволяют провести многие измерительные операции и объемное моделирование процессов теплообмена. С целью расширения практических возможностей измерений и теплофизических исследований геологических процессов лабораторными методами на сравнительно крупных (до 1 м<sup>3</sup>) объемах горных масс в Лаборатории экспериментального рудообразования ИГиГ СО АН СССР разработана новая система моделирования гидротермальных процессов с одновременными теплофизическими исследованиями — проточный высокотемпературный термоградиентный эндоклав (Дударев, 1969).

Длительная работа с этой системой натолкнула нас на мысль о геологических модельных исследованиях по этому принципу в полевых условиях на больших объемах ( $n \times 1000$  м<sup>3</sup>) пород в естественном залегании. Постановка подобных экспериментальных работ, по нашему мнению, дает принципиально новые возможности для создания замкнутых геолого-физических и гидродинамических модельных систем, приближающихся к природным.

Воспроизведение динамических процессов, охватывающих значительные объемы горных пород, требует особой технологии опытов. Всесторонние исследования геохимических многоступенчатых процессов переноса энергии и вещества, в результате которых формируются различного рода геохимические зональности — рудоотложения, метасоматических колоннок, интрузивных тел и др. — требуют создания гетерогенных систем раствор — расплав — твердые породы, газ — твердая порода и т. д. с широким диапазоном температур, в которых наряду со значительным объемом расплава и раствора были бы зоны, свободные от каких-либо тепловых или иных воздействий, являющихся в своем роде началом отсчета.

Изучение процессов теплообмена при взаимодействии гидротермальных растворов или расплавов с горными породами практически информативно только тогда, когда экспериментатор имеет возможность для непосредственного измерения (и управления) эффективных потенциалов теплопереноса в ходе опыта в совокупности с наблюдениями за динамикой температурного и влажностного полей исследуемого процесса или объекта. Такая поставка опыта также требует специаль-

ного технологического решения и создания принципиально нового вида эксперимента.

Отметим также, что моделирование на малых объемах пород (в лабораторных условиях) не позволяет в одном образце создать многозональную сложную систему с полным циклом возможных превращений пород, с замкнутым циклом активизации, переноса и отложения рудного и петрогенного вещества. Как правило, в малом образце при интенсивном локальном нагревании его центра создаются весьма жесткие условия эксперимента: быстрый нагрев, большие градиенты температур, быстрое высушивание и высаливание растворов.

Аналитические методы для исследования сложных гидротермальных систем с неопределенными граничными условиями, с переменными в пространстве и во времени условиями и особенностями эволюции процессов, при тесном взаимодействии различных механизмов тепло-массопереноса, в настоящее время мало эффективны.

Проведение полевых экспериментальных работ было связано с большими техническими трудностями, преодолеть которые удалось благодаря помощи работников Алмалыкской ГРЭ и треста «Ташкентгеология». Авторы книги благодарны всем служащим экспедиции и треста, принимавшим участие в организации опытных работ и особенно старшему геологу экспедиции Н. Ф. Вологдину.

Большую помощь в статистической обработке материалов оказала сотрудник ВЦ СО АН СССР Р. Д. Мишкович, за что авторы ей весьма признательны.

Исследования физических и химических процессов в твердых, жидких и газообразных системах показывают, что на ход различных превращений вещества огромное влияние оказывают неоднородные температурные поля. Особенно велика роль термоградиентных условий в процессах массопереноса. Некоторые проблемы термодиффузионной дифференциации вещества и массопереноса рассмотрены в ряде геологических работ в связи с исследованием процессов рудообразования, контактового метаморфизма, метасоматоза и др. (Шипулин, 1960; Поспелов, 1953, 1959, 1963; Овчинников, 1955, 1957, 1967 и др.). Так, например, П. Н. Кропоткин (1957, с. 81) считает, что «...пневматолизис и гидротермальное оруденение в подавляющей своей массе выпадает в той зоне, где вследствие наличия интрузива имеет место наиболее резкий спад температур в вертикальном направлении, т. е. в зоне максимальных значений геотермического градиента».

Роль неоднородного нагревания для динамики разнообразных процессов в геологических средах значительна. Подтверждение этому можно найти в работах, исследующих влияние естественных (Кропоткин, 1957) или искусственных (Конов, 1965; Богородицкий, 1966) очагов нагревания (термоаномалий) на физическую и химическую перестройку горных пород в районах современной гидротермальной и вулканической деятельности, при проведении подземной газификации углей (ПГУ), в районах развития вечной мерзлоты и т. д. В частности, многочисленными исследованиями в вулканических областях подтверждается своеобразное поведение элементов и вторичных минералов горных пород в зависимости от температурного режима геотермальных очагов (Овчинников, 1957).

Детальнее остановимся на примерах не менее интересных, но не так широко известных — из области подземной газификации твердого топлива. Экспериментальными работами Д. К. Семененко, И. А. Турчанинова (1957) на Подмосковном участке газификации найдено, что при нагревании глины уже до температуры 200°C в породах появляются мелкие вертикальные трещины. Этот процесс наблюдается до 800°C. При 1200°C образуется однородный расплав темно-коричневого цвета, обволакивающий зерна кварца. Проницаемость глин, например, типа «Синика» в интервале температур 400—900°C изменяется от 0,02 до 0,08 мД. Пористость ее сначала резко повышается до 49,6% при температуре в 600°C, а затем снижается при 1200°C до 20,6%. Пористость песчанистой глины изменяется незначительно — от 22,1 (100°C) до 28 (1000°C) и 27,5% (1200°C).

Пески менее подвержены термическому воздействию, чем глины. В основном при нагревании меняется их объемный вес, проницаемость, увеличивается содержание крупных фракций при спекании мелких частиц. Пористость песка изменяется на 1—2%. Максимальная проницаемость — в интервале 600—900°C.

В известняках при 700°C появляются трещины, а при 900°C они обычно разрушаются. Газопроницаемость известняков изменяется от 0 (при 20°C) до  $6,2 \cdot 10^{-3}$  мД (при 900°C).

Замечено, что при невысоких давлениях с ростом температуры до 800—1000°C проницаемость осадочных пород резко увеличивается и лишь при больших температурах в результате спекания и оплавления пород она может понизиться.

При изучении участков подземной газификации углей В. И. Кононов (1965) отметил своеобразные гидротермические преобразования и выделил три зоны с различными гидротермическими условиями: 1—циркуляции паро-газовой смеси; 2—аномально-нагретых вод; 3—подземных вод с обычной температурой, но с аномальным химическим составом.

В зоне 1 все виды вод переходят в парообразное состояние, наблюдается значительная диссоциация воды (от  $1,4 \cdot 10^{-8}$  при 100°C до  $2,52 \cdot 10^{-7}$  при 1000°C); изменяются ее физические свойства. На Подмосковном участке ПГУ такая зона с температурой от 1200 до 114°C распространяется от очага газификации на 6 м вверх и на 1 м вниз. На Лисичанском участке ПГУ она имеет температуру от 1300 до 120°C. При взаимодействии пород и газо-паро-водяной смеси при высоких температурах последняя сильно минерализуется. Спектральными анализами установлено, в частности, что из песчанистых и глинистых пород Подмосковского участка выносятся Be, Mn, Pb, Sn, W, Cu, а из песчано-глинистых сланцев и углей Лисичанского участка еще и As, Sb, Fe. Характерно, что в зоне 1 обоих участков нет Ni, Sr, Ba, присутствующих в породах и водах двух других зон.

К. Ф. Богородицкий (1961) подсчитал, что при подземной газификации углей может выноситься от 0,5 до нескольких десятков килограммов в год редких элементов.

Зона 2 характеризуется значительным воздействием теплового очага, но температуры в ней ниже критической (114°C для Подмосковного участка и 120°C для Лисичанского). На Подмосковном участке мощность зоны 2 равна 6—17 м в кровле и 1—5 м в почве очага. На Лисичанском участке соответственно 3—8 и 3—6 м. Для зоны характерно обилие горячих химически активных газов ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2$ ); здесь же происходит и конденсация паров воды, поступающих из очага. Воды зоны 2 обладают повышенной растворяющей и миграционной способностью. Вязкость их уменьшается от  $131 \cdot 10^{-6}$  до  $28,8 \cdot 10^{-6}$ , а плотность — от 0,9997 до 0,9584 г/см<sup>3</sup>. Воды обогащены ионами  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HS}^-$ ,  $\text{Fe}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$ . На Лисичанском участке в водах зоны 2 спектрально обнаружены Mn, Pb, Cu, Ni, Ti, Sr, Li, которые отсутствуют в зоне 3.

Зона 3 на Подмосковном участке расположена на глубине 17 м от поверхности. На Лисичанском участке — выше 8 м в кровле и ниже 7 м в почве очага. Площадь этой зоны на Подмосковном участке около 30 км<sup>2</sup>, температура естественная, встречаются отдельные аномальные участки с повышенной температурой (в результате прорыва горячих газов).

Исследуя многочисленные материалы по влиянию естественных и искусственных тепловых очагов, не связанных с газификацией топлива, В. И. Кононов (1965) также выделяет около них три зоны с различным состоянием воды. Так, в зоне 1, непосредственно окружающей очаг, температура больше 700°C, водные растворы находятся исключительно в газообразном состоянии. В зоне 2 температура снижается до 400°C. Здесь присутствует смесь газов и жидкости. Во внешней зоне 3 подземные воды имеют температуру 100—300°C и находятся в жидком состоянии.

В паро-газовых смесях вблизи искусственных очагов тепла были обнаружены многие малые элементы (аналогичные вулканическим эксгаляциям). Однако наиболее существенной при этом является вещественная дифференциация различных температурных зон этих систем. Так, Li, Co, Ni, Sr, Ba обнаружены лишь в подземных водах и не содержались в конденсатах паро-газовых струй (т. е. наблюдается отгонка этих элементов из области нагрева).

Напротив, Be, As, Se, Tl, Sb, Sn,—присутствуют в основном в паровой фазе и не зафиксированы в подземных водах. Концентрация ряда элементов — Sb, Pb, Ni, Ln, As, Bi—в возгонах и конденсатах заметно возрастает по сравнению с их содержанием в породах.

Отсюда видно, что тепловой очаг в длительно работающей природной гидротермальной системе способен активно влиять на зональное распределение элементов в окружающей среде.

Основной научной целью постановки экспериментов являлось изучение процессов переноса вещества и энергии во влажных средах в условиях повышенных температур и значительных температурных градиентов с последующим использованием их при анализе рудообразующих процессов и разработке поисково-прогнозных рекомендаций.

Создание длительно существующего регулируемого источника высокой температуры и потока вещества в большом объеме пород, насыщенном датчиками регистрирующей аппаратуры, фиксирующими различные характеристики тепловых, массообменных и химических процессов, позволяет исследовать многие особенности моделируемого процесса. Совокупность решаемых при этом задач может быть разделена на следующие: 1) физико-химические закономерности; 2) теплофизические и энергетические особенности; 3) кинетика и динамика процессов; 4) физические преобразования вмещающей среды. В экспериментах 1970—1973 гг. не все эти направления получили развитие. В известной степени они выделены условно, с тем, чтобы наметить в дальнейшем постановку многочисленных частных задач. В предварительных лабораторных и полевых исследованиях на первых этапах основное внимание уделялось вопросам тепло-массообмена и гидротермального рудообразования.

Обращаясь к моделированию сложного рудообразующего процесса, следует отметить, что классическая теория гидротермального рудообразования не может достаточно удовлетворительно объяснить все многообразие проявлений эндогенного процесса. Детальное изучение месторождений, их минералого-геохимических и генетических особенностей, результаты экспериментального моделирования отдельных сторон рудного процесса, геохимические исследования распределения элементов в различных сериях пород и т. д.—все это даст основание говорить о полигенетическом характере формирования рудоносных растворов и месторождений. При этом многопричинным и сложным становится круг факторов, способствующих формированию вещественной нагрузки растворов и управляющих их движением и разгрузкой. Одним из ведущих факторов бывает тепловая обстановка: именно в термоактивных зонах формируются месторождения.

Влияние теплового фактора многообразно. С целью выяснения некоторых его сторон и планировался полевой эксперимент, конечная задача которого — моделирование тепловой зоны в природных условиях. Постановке «природного» эксперимента предшествовала большая работа по изучению теплофизических параметров вмещающих пород различных месторождений, а также многочисленные лабораторные исследования проявления отдельных теплофизических и геохимических эффектов в рыхлых и монолитных средах при воздействии растворов с разной рудной нагрузкой в условиях неоднородного температурного поля.



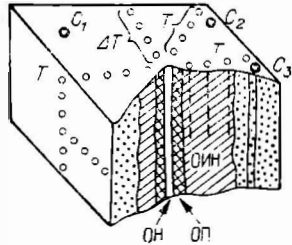


Рис. 1. Схема крупномасштабной геолого-физической модели области неоднородного нагрева.

ОН — очаг нагрева; ОИН — область интенсивного нагрева; ОП — область плавления;  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  — входы и выходы для подачи растворов и газов;  $T$  — датчики температуры,  $\Delta T$  — термоградиментные датчики.

Данные последних экспериментов подтверждают значительное влияние теплового фактора при эндогенном рудообразовании и на движение растворов, активизацию, мобилизацию и последующую концентрацию элементов. С целью проверки полученных при лабораторных исследованиях результатов в значительно более сложных природных условиях и планировался «природный» эксперимент. Вместе с тем условия полевого эксперимента позволили внести ряд дополнительных факторов с тем, чтобы приблизить его к эндогенному процессу.

Поставленная задача включала ряд вопросов, последовательное исследование которых представляло большой интерес:

1. Пути и причины движения растворов в условиях неоднородного теплового поля в породах различной проницаемости.

2. Тепло- и массопоток в различных участках температурного поля в зависимости от мощности источника нагрева.

3. Распределение (зональность) элементов в районе влияния теплового источника (на примере  $Cu$ ,  $Mo$ ,  $Co$  и др.).

4. Влияние мощности теплового источника на масштабы концентрации элементов и их распределение вокруг источника. Конфигурация «рудных концентраций» в условиях однородной и неоднородной сред и др.

В центре участка пород значительных размеров и различного состава помещался достаточно мощный, способный расплавить некоторый объем породы, нагреватель (или несколько нагревателей) (рис. 1). В экспериментальном блоке размещали различные измерительные датчики, входы для растворов и т. п. В течение длительного времени по разработанной программе проводился опыт, в ходе которого исследовались теплодинамические, массообменные, энергетические и другие параметры. До и после эксперимента тщательно исследовались геолого-структурные особенности участка, физические и химические особенности слагающих его пород, характер распределения рудных элементов и т. д.

## ОБЗОР ЛАБОРАТОРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В лабораторных экспериментах, предшествовавших полевым исследованиям, проверялись два предположения, объясняющие в известной мере механизм физико-химического действия неоднородного температурного поля: а) увеличение проницаемости и пористости пород в определенных интервалах температур и на определенных участках наложенного температурного поля; б) активизация, мобилизация и направленное перемещение поровых растворов с возможным отложением из них рудных компонентов в некоторых критических участках термоградиентного поля. Рассмотрим эти две тенденции.

### ИЗМЕНЕНИЕ ПОРИСТОСТИ ПОРОД С НАГРЕВАНИЕМ

Уже простейшие поисковые опыты по локальному нагреванию рыхлых или сцементированных увлажненных сред показали, что в определенных участках температурного поля происходят механические перестройки первоначально однородной среды. В одних местах она уплотняется, в других образуются значительные пустоты и происходит термомеханическое разрыхление, видимое простым глазом. Заметное увеличение количества пустот часто наблюдается в зонах максимального разогрева и разрушения среды и на границах фазовых превращений. Так, простое нагревание карбонатных пород в градиентном температурном поле дает заметный эффект дифференциации величин удельной поверхности. В зоне нагревания до  $100^{\circ}\text{C}$  удельная поверхность равна  $0,06 \text{ м}^2/\text{г}$ ; при  $200^{\circ}\text{C}$  —  $0,21$ ; при  $300^{\circ}\text{C}$  —  $0,16$ ; при  $400^{\circ}\text{C}$  —  $0,19$  и при  $500^{\circ}\text{C}$  —  $0,7 \text{ м}^2/\text{г}$ .

Большой интерес в этом отношении представляет исследование влияния термообработки на пористость различных пород, отобранных с площади Сорского медно-молибденового месторождения (Хакасская АО). Экспериментально была изучена эволюция пористости неизмененных пород Сорского месторождения (лейкократовые граниты, порфиры I и порфиры II) и развитых по ним метасоматических образований. Все породы подвергались последовательному нагреванию до  $900^{\circ}\text{C}$ . Через каждые  $100^{\circ}\text{C}$  образцы охлаждались и проводилось определение открытой пористости ( $K_{\text{от.}}$ , %) методом Преображенского (Кобранова, Лепарская, 1957), прослеживались необратимые изменения пород при нагревании (рис. 2).

Возрастание открытой пористости начинается в интервале температур  $300\text{—}400^{\circ}\text{C}$ . Иногда эта ступень смещается в сторону большей температур и несколько выполаживается. Такой температурный интервал скачка увеличения пористости соответствует температуре основной рудной фазы минерализации Сорского месторождения (табл. 1). По-видимому, в этих условиях происходит активизация поровых (законсервированных) растворов, что приводит к механическому разрушению пород и является одной из причин возрастания пористости. Вторая ступень

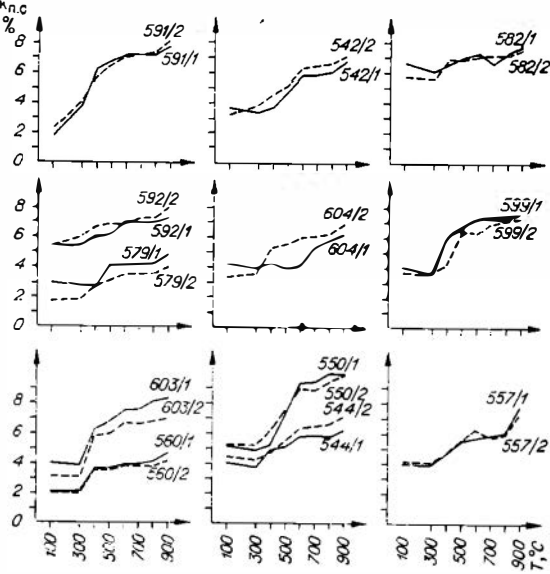


Рис. 2. Особенности изменения пористости гранитоидных пород Сорского месторождения при нагревании от 100 до 900°C.

увеличения пористости (800—900°C) обусловлена начинающимся термическим разрушением образца. Не совсем ясна причина некоторого сокращения порового пространства при переходе от 100 к 300°C, наблюдаемого для многих пород. Отметим также, что вторичные процессы изменения пород (кальцитизация, окварцевание, альбитизация и серицитизация), как правило, повышают открытую пористость пород. Более резкое возрастание пористости при нагревании для альбитизированных (измененных) пород обусловлено массовым вскрытием газовой жидких включений. Интервалы

температур вскрытия пор близки к температурам их закрытия в момент минералообразования. В частности, пологая площадка у альбитизированных гранитоз (обр. 591) прослеживается от 600°C. Это согласуется с данными по го-

Таблица 1

Эволюция открытой пористости пород (К.п. о) при нагревании, %

№ образца	Порода	Температура, °C							
		100	300	400	500	600	700	800	900
557/1	Лейкократовый гранит	3,99	3,94	4,69	5,53	5,72	5,89	5,98	7,71
557/2		4,18	4,08	4,72	5,59	6,25	5,78	5,91	7,29
560/1		2,04	2,15	3,64	3,56	3,90	3,96	4,14	4,61
560/2		2,04	1,93	3,55	3,52	3,83	3,60	3,71	4,12
599/1	Калишпатизированный гранит	4,06	3,63	6,24	7,39	7,32	7,25		7,67
599/2		3,68	3,67	4,33	6,60	6,30	6,96	7,22	7,30
591/1	Альбитизированный гранит	1,77	3,81	6,21	6,62	7,04	7,14	7,08	7,67
591/2		2,23	4,16	5,58	6,46	7,09	7,11	7,25	8,09
592/1		5,40	5,34	6,03	6,09	6,97	6,88	6,88	7,21
592/2		5,40	5,92	6,61	6,81	6,74	7,14	7,25	7,95
550/1	Серицитизированный гранит	5,15	4,89	5,27	7,30	9,33	9,46	9,92	9,86
550/2		5,29	5,27	6,23	7,52	8,94	8,35	9,40	9,78
573/1	Порфир I	3,02	2,74	2,67	4,11	4,03	4,17	4,20	4,83
579/2		1,77	1,85	2,73	3,06	3,44	3,47	3,49	3,92
603/1	Калишпатизированный порфир	4,01	3,81	6,20	6,77	7,57	7,55	8,08	8,29
603/2		3,11	3,06	5,80	5,99	6,66	6,59	6,80	6,94
604/1	Альбитизированный и окварцованный порфир I	4,26	3,90	4,34	3,96	4,09	5,32	5,84	6,18
604/2		3,40	3,56	5,25	5,50	5,94	6,02	6,21	6,81
582/1	Серицитизированный порфир I	6,62	6,04	6,60	7,04	7,28	6,64	7,31	7,71
582/2		5,75	5,62	6,94	6,84	7,10	7,17	7,21	7,60
542/1	Калишпатизированный, альбитизированный порфир II	3,63	3,39	3,72	4,82	5,83	5,84	6,03	6,74
542/2		3,20	3,85	4,69	5,15	6,33	6,46	6,56	7,09
544/1	Альбитизированный порфир II	4,04	3,77	4,88	5,13	5,80	5,84	5,75	6,22
544/2		4,41	4,25	4,75	5,53	6,37	6,49	6,65	7,03

могенизации включений (Берзина, Сотников, 1968) и характеризует, очевидно, верхнюю температурную границу закрытия пор. Серицитизированные породы (обр. 550), сформированные при относительно пониженных температурах, фактически уже при 400—500°C дают существенное возрастание объема пор. Нижний подъем графика пористости соответствует наложенным более низкотемпературным (интервал температур 300—400°C) процессам.

### ТЕРМИЧЕСКАЯ МОБИЛИЗАЦИЯ ПОРОВЫХ РАСТВОРОВ И ВЕЩЕСТВА ПОРОД

Для изучения термоградиентной мобилизации вещества вокруг локального источника энергии поставлены многочисленные качественные и количественные эксперименты на рыхлых и монолитных средах.

Опыт № 10 в целях исследования перераспределения рудных элементов под влиянием фильтрующей жидкости и теплового поля проводился (в течение 4 часов) с цилиндрическим образцом (диаметр 62 мм; высота 500 мм), приготовленным из смеси песка и цемента (1:1) на растворе солей  $(\text{NH}_4)_2\text{MoO}_4$ ,  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{CoNO}_3$ , с концентрацией 0,001 М.

Образец вертикально помещался в слитковую нагревательную печь так, что он нагревался в средней части. Тепловой режим фиксировали шестью термодарами, введенными в образец на глубину 5 мм от поверхности (рис. 3), снизу и сверху к нему подводилась вода, не содержащая Mo, Cu, Co.

После эксперимента определялись плотность, открытая пористость, проводился количественный спектральный анализ на Mo, Cu и Co (табл. 2, см. рис. 3).

Скорость пропитки образца в 1-й час — 35 мл; во 2-й — 45; в 3-й — 60; в 4-й — 60 мл. Увеличение количества пропитываемой воды во второй половине опыта обусловлено некоторым повышением температуры нагрева образца в этот период.

Т а б л и ц а 2

Некоторые характеристики опытного образца

№ пробы	$\sigma$ , г/см <sup>3</sup>	К <sub>п.о.</sub> %	Содержание, %		
			Mo	Cu	Co
I	2,10	13,30	0,00050	0,0060	0,0016
II	2,33	2,18	0,00050	0,0030	0,0010
III	2,20	7,49	0,00060	0,0030	0,0012
IV	2,03	54,48	0,00048	0,0030	0,0008
V	2,78	51,27	0,00034	0,0020	0,0007
VI	2,05	11,00	0,00050	0,0028	0,0010
VII	1,90	19,64	0,00036	0,0027	0,0005
VIII			0,00035	0,0018	0,0005
IX			0,00033	0,0019	0,0005
X	Зона термического разрушения		0,00012	0,0015	0,0001
XI			0,00039	0,0020	0,0004
XII			0,00035	0,0015	0,0005
XIII			0,00040	0,0016	0,0005
XIV	2,43	16,75	0,00037	0,0018	0,0005
XV	2,01	13,31	0,00033	0,0017	0,0005
XVI	2,06	10,97	0,00035	0,0018	0,0005
XVII	2,35	2,19	0,00028	0,0018	0,0004
XVIII	2,64	—	0,00018	0,0017	0,0003

Поле температур. Максимальный нагрев составил 700°C. В верхней части образца градиент температур более постоянный, чем в нижней. Граница кипения вверху (верхняя фазовая граница) при установившемся температурном режиме отстоит от нагревателя на расстоянии 10 см; а внизу — на 2 см. При нагревании в образце образовались две трещины А и Б (см. рис. 3).

Распределение молибдена в образце равномерное при исходном его содержании  $3,6 \times 10^{-4}\%$ , после эксперимента оно составило  $(1,2—6,0) \cdot 10^{-4}\%$ . По длине образца содержащие

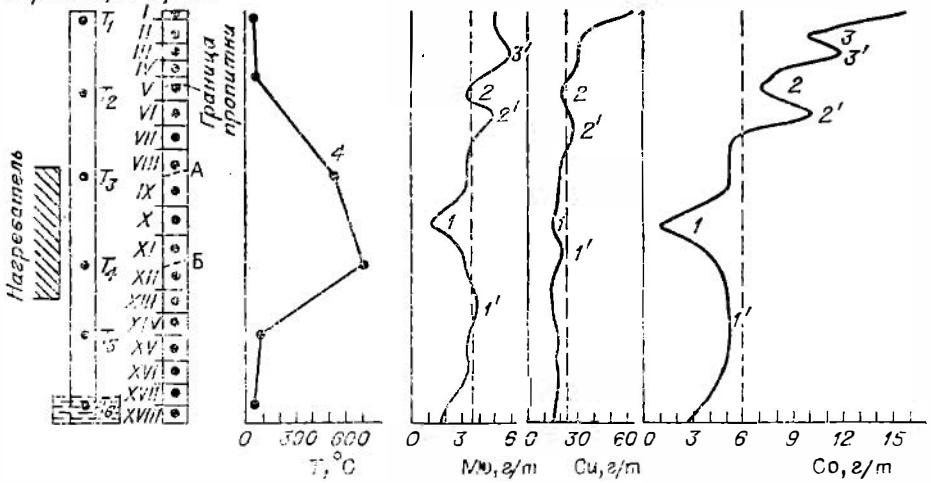


Рис. 3. Температуры нагревания ( $T$ ), содержание рудных элементов (Mo, Cu, Co), стоимость ( $K_{п.о.}$ , %) в

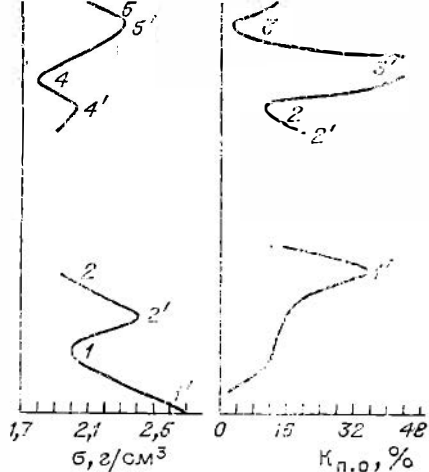
$T_1$ — $T_5$  — термопары, 1—XVIII — пробы; А, Б — трещины, 1, 2, 3, ... — минимумы, 1', 2', 3' —

Mo возрастает снизу вверх от  $1,8$  до  $5-6 \cdot 10^{-4}\%$  (пробы XVIII и I—III). Локальные минимумы содержания Mo на фоне возрастающей кривой отмечены в двух случаях: в средней части зоны нагрева (экстремум 1) и на верхней фазовой границе (экстремум 2). Наиболее значительный минимум характерен для зоны нагрева, где содержание Mo в пробе из участка максимального нагрева (центральная часть) снижается до  $1,2 \cdot 10^{-4}\%$ . Минимум этот асимметричный, с более пологой верхней ветвью (над нагревателем и в его верхней части).

Локальные максимумы приурочены к нижней фазовой границе ( $1'$ ); к участку под верхней фазовой границей ( $2'$ ) и к участку над верхней фазовой границей ( $3'$ ). При этом, если два последних максимума проявлены четко с крутыми симметричными ветвями, то нижний ( $1'$ ) менее отчетлив при пологом и асимметричном расположении ветвей (нижняя ветвь более пологая). Максимальные количества Mo характерны для верхних экстремумов:  $3'—6,0 \cdot 10^{-4}\%$ ;  $2'—5,0 \cdot 10^{-4}\%$ . Для нижнего максимума отмечено только  $4,0 \cdot 10^{-4}\%$  Mo. Если проследить наличие Mo в соседних участках, то и здесь фиксируется относительное накопление элемента. Во всех случаях Mo концентрируется в участках максимальных температурных градиентов.

Отмеченные максимумы отражают накопление Mo по отношению к исходному его содержанию, преобладает он в верхней части образца, расположенной над нагревателем. Здесь, по-видимому, концентрируется Mo, вынесенный из зоны нагревания и частично из области верхней фазовой границы. Нижняя (под нагревателем) область повышенных концентраций молибдена образовалась, очевидно, за счет выщелачивания элемента из нижней части образца, который подвергался интенсивному воздействию диффундирующей воды, движущейся по направлению к источнику тепла. Нижний максимум  $1'$  (как и верхний  $2'$ ) находится в области прогрева образца в  $200-400^\circ\text{C}$ . Третий максимум ( $3'$ ) располагается в верхней торцевой части образца в области его конденсационного увлажнения. По-видимому, вода, конденсированная в верхней части образца, служила своеобразным экраном.

Распределение меди. Исходная концентрация меди в образце равна  $2,3 \cdot 10^{-3}\%$ . Диапазон изменений количества Cu в пробах после опыта составляет  $(1,5-6,0) \cdot 10^{-3}\%$ . Распределение Cu по высоте



плотность ( $\rho$ , г/см<sup>3</sup>) и открытая пористость № 10.  
максимумы в распределении элементов.

образца существенно отличается от распределения Mo в первую очередь большей равномерностью. Вместе с тем сохраняется общая тенденция к увеличению содержания элемента в верхней части образца, это происходит более постепенно, чем у Mo. Резких максимумов и минимумов нет. Однако более слабые экстремумы намечаются и в распределении Si, они часто совпадают с экстремумами распределения Mo: сохраняются пологие экстремумы (2—2<sup>1</sup>) в верхней части образца на границе зоны пропитки. Максимум под границей фазового превращения (3<sup>1</sup>) для Si не проявлен, но в верхней зоне образца содержание ее резко увеличивается от  $3 \cdot 10^{-3}$  до  $6 \cdot 10^{-3}\%$ , что не характерно для «молибденовой кривой». После максимума 3<sup>1</sup> в торцевой части несколько уменьшилось содержание Mo. На «медной кривой» (см.

рис. 3) слабо проявлены нижние экстремумы (1—1<sup>1</sup>). При этом если минимум (1), как и на графике содержания Mo, приходится на центральную часть зоны прогрева, то максимум 1<sup>1</sup> по сравнению с аналогичным молибденовым максимумом смещен несколько больше в зону нагрева.

В распределении Si относительно исходного содержания после эксперимента на профиле содержания элемента выделяются два участка повышенной концентрации, образованные за счет выщелачивания элемента как из области нагрева, так и из нижних частей образца (под нагревателем). Концентрация Si в верхней части образца значительно выше, чем концентрация Mo. В целом участок повышенной концентрации Si по сравнению с Mo отстоит дальше от теплового источника.

Распределение кобальта. Исходная концентрация Co —  $6 \cdot 10^{-4}\%$ . Диапазон содержаний после эксперимента — от  $1 \cdot 10^{-4}$  до  $1,6 \cdot 10^{-3}\%$ . Распределение Co в общем сходно с распределением Mo, но характеризуется еще более резким проявлением максимумов и минимумов. В максимуме 3<sup>1</sup>, расположенном в непосредственной близости к верхней торцевой поверхности образца, отмечено  $1,6 \cdot 10^{-3}\%$  Co. В целом сохраняется тенденция преимущественного накопления Co в верхней части образца, главным образом над верхней границей фазовых переходов. Из зоны максимального нагрева наблюдается вынос Co, превосходящий вынос Mo и особенно Si.

Анализируя характер поведения этих элементов при нагревании, можно отметить, что при перераспределении элементов в образце наблюдается определенная зональность, выражающаяся в приуроченности к теплому источнику участков повышенной концентрации Mo при относительной удаленности Si. К Mo несколько приближается распределение Co, хотя его концентрация повышена и в верхней части образца, в области экранирующего действия конденсированной воды.

Плотность образца в отдельных его частях изменяется от 1,7 до 2,63 г/см<sup>3</sup>, на графике видно несколько локальных экстремумов. Наиболее выраженные минимумы на кривой плотности ограничивают сверху и снизу область нагрева. Замеров плотности в пределах зоны прогрева из-за разрушения образца не проводилось.

Области верхней фазовой границы соответствует плотностной минимум 4, переходящий постепенно вверх, в максимум 5<sup>1</sup> (см. рис. 3), характеризующий зону накопления вещества. Уменьшение плотности

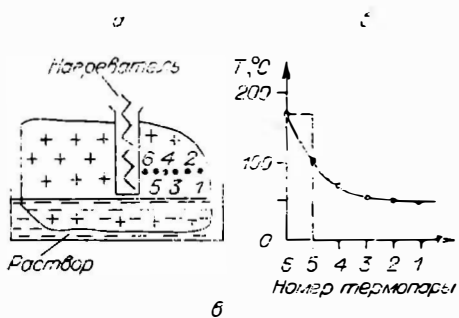
В самом верху образца объясняется разрушающим действием воды (зона пропитки). Положение минимума плотности 4 совпадает с минимумами содержания элементов. Расположенный ниже (под фазовой границей) плотностной максимум 4<sup>1</sup> соответствует максимумам 2<sup>1</sup> на кривых содержания рудных компонентов и, по-видимому, фиксирует один из участков концентрации вещества. Нижней фазовой границе в отличие от верхней соответствует максимум плотности 2<sup>1</sup>. По-видимому, здесь имели место привнос и концентрация растворимых компонентов из нижней части образца, характеризующейся пониженной плотностью 1.

Открытая пористость меняется от 2 до 55 %. При этом большей пористостью характеризуются участки верхней фазовой границы (вынос вещества) и область нижней границы прогрева образца (1<sup>1</sup>). При средней пористости образца (8—10%) в указанных участках она увеличена в 3—5 раз. Эти же участки характеризуются минимумами плотности и содержания рудных элементов. В зоне интенсивного прогрева пористость образца не определялась: в связи с образованием зоны термического разрыхления возникли высокопористые, с низкой плотностью продукты, из которых в значительной степени вынесены легкоподвижные компоненты.

### ТЕРМОГРАДИЕНТНОЕ ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕ КОМПОНЕНТОВ ГРАНИТА ПРИ СЛАБОМ НАГРЕВАНИИ

В качестве объекта для эксперимента был взят монолитный образец среднезернистого гранита с нагревателем в центре (рис. 4). Рабочий раствор  $H_2O + 0,01 (NH_4)_2 MoO_4 + 0,2 Na_2CO_3$  с постоянным уровнем. Температурное поле измерялось через 1 см в шести точках (1—6) при помощи записи показаний термопар на электронном потенциометре (непрерывная запись). Максимальные температуры нагревателя достигали 170°C (термопара 6). Мощность зоны 100-градусного нагрева распространялась от нагревателя на расстояние 1 см; изотерма 50°C отстояла на 2,5 см. Продолжительность опыта 360 ч.

Цели эксперимента: 1) исследование распределения молибдена в образце под влиянием источника тепла; 2) изучение перераспределения породообразующих компонентов; 3) особенности изменения физических свойств образца.



### Физические особенности гранита

Плотность образца (рис. 5, табл. 3) в отдельных точках изменяется от 2,48 до 2,82 г/см<sup>3</sup>. До опыта, судя по данным трех независимых определений, средняя плотность образца равна 2,52—2,53 г/см<sup>3</sup>. Построенные зоны повышенных (А, А<sup>I</sup>, А<sup>II</sup>) и пониженных (Б, Б<sup>I</sup>, Б<sup>II</sup>) значений плотности (см. рис. 5). Оказалось, что полосы аномальных величин плотности образуют коническую структуру с широким основанием внизу.

Удельная теплоемкость локальных участков образца меняется от 0,238 до 0,452 ккал/г·°С.

Рис. 4. Схема эксперимента.

а — в разрезе, б — распределение температуры; в — опробование образца после нагревания.

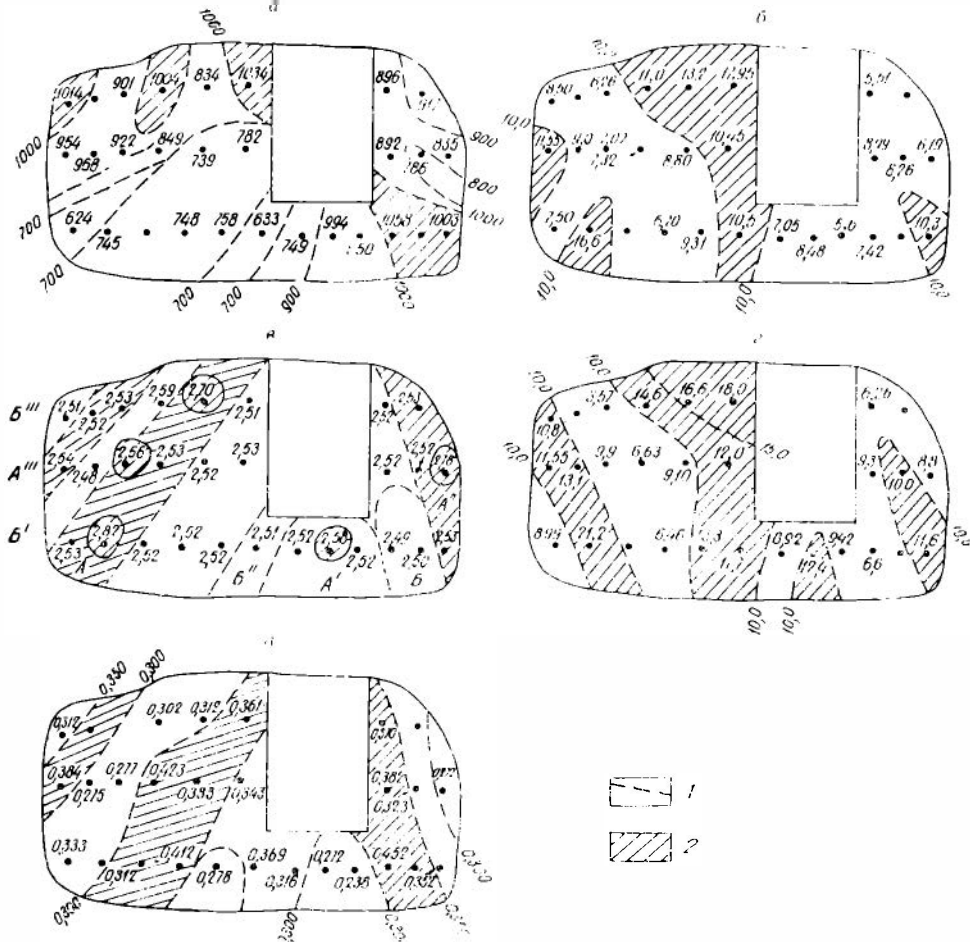


Рис. 5. Изменение физических свойств образца гранита после нагревания.

Распределение: а — теплоты растворения (кал/г); б — теплопроводности (кал/см·с·°С); в — плотности (г/см³); г — температуропроводности (см²/с); д — теплоемкости (кал/г·°С). 1 — изолинии одинаковых величин свойств; 2 — области повышенных величин физических свойств. Точкой обозначено место взятия образца.

Изолинии теплоемкости (0,300; 0,350 и др.) дают картину, внешне сходную с распределением плотностей. Зоны пониженных значений теплоемкости по сравнению с плотностью как бы поменялись местами. В активной зоне образца (зона прогрева больше 100°С) или на небольшом удалении от нее теплоемкость повышена. Зона повышенных значений теплоемкости тяготеет к области максимального прогрева.

Зоны повышенных и пониженных значений коэффициентов тепло- и температуропроводности соответствуют температурному полю образца. Теплопроводность изменяется от 5,51 до  $17,95 \cdot 10^{-3}$  кал/см·с·°С; температуропроводность — от 3,57 до  $21,2 \cdot 10^{-3}$  см²/с.

Теплота растворения образца в плавиковой кислоте меняется от 624 до 1058,1 кал/г. В вертикальной плоскости опробования образца теплота растворения распределена упорядоченно. Выделяются зоны пониженной и повышенной теплоты растворения, расположенные под углом или перпендикулярно к изотермам, отражая тем самым особенности перераспределения вещества (см. рис. 5).

По-видимому, вещественные и физические перестройки в опытном образце происходили по схеме: «тепловое всасывание» раствора снизу — перемещение его вверх к нагревателю — вынос раствора в верхние



## Теплофизические свойства гранита

№ образца	$\sigma$ , г/см <sup>3</sup>	$C$ , кал/г·°С	$\lambda \cdot 10^{-3}$ , кал/см·с·°С	$\alpha \cdot 10^{-3}$ , см <sup>2</sup> /с	$N$ , кал/г
1	2,53	0,333	7,59	8,99	623,7
2	2,82	0,312	16,60	21,20	744,8
3	2,52	—	—	—	—
4	2,52	0,412	6,46	6,70	747,9
5	2,52	0,278	9,31	13,30	757,9
6	2,51	0,359	10,50	11,70	632,7
7	2,52	0,316	7,05	8,92	743,6
8	2,58	0,272	8,48	12,40	950,4
9	2,52	0,238	5,60	9,42	1050,4
10	2,49	0,452	7,42	6,60	1058,1
11	2,50	—	—	—	—
12	2,53	0,352	11,30	11,60	1002,7
13	2,54	0,384	11,55	11,55	953,7
14	2,48	0,275	9,00	13,10	967,7
15	2,56	0,277	7,07	9,90	921,6
16	2,53	0,423	7,32	6,63	848,5
17	2,52	0,383	8,80	9,10	738,7
18	2,53	0,343	10,45	12,10	781,9
19	2,51	0,312	8,50	10,80	1013,8
20	2,52	—	—	—	—
21	2,53	—	6,26	3,57	901,4
22	2,52	0,302	11,10	14,60	1004,0
23	2,70	0,288	13,20	16,60	833,8
24	2,51	0,361	17,95	18,95	1033,8
25	2,52	0,382	8,99	9,30	891,6
26	2,53	0,323	8,26	10,05	786,1
27	2,78	0,272	6,19	8,80	835,2
28	2,53	—	—	—	—

части образца и растекание его в стороны от теплового источника. Это, очевидно, и обусловило появление конических зон при распределении теплоты растворения и других физических параметров.

### Распределение петрогенных и рудных компонентов

Особенности распределения химических компонентов в образце после эксперимента изучались на основании квантометрического анализа содержаний  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  и  $\text{MnO}$ ; пламенной фотометрии  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  и количественного спектрального анализа на  $\text{Mo}$  (рис. 6, табл. 4).

В распределении петрогенных элементов относительно теплового источника намечаются некоторые тенденции. Повышенная концентрация  $\text{K}$  зафиксирована в зоне наибольшего прогрева. Для  $\text{Na}$  характерно пониженное содержание в

участках максимального прогрева, он перегруппировался в более холодные части образца и вынесен из зоны прогрева.  $\text{Fe}$  накапливается в более прогретых частях образца, здесь его содержание достигает 0,95—0,97% (при содержании в исходном образце — 0,65%).  $\text{Si}$  выносится из зоны нагрева, где его содержание снижается до 72—73% (при исходном количестве — 76%). При исходном содержании  $\text{Mo}$  в породе 0,0002, в зоне прогрева его количество возрастает до 0,001—0,008% (в 30—40 раз больше по сравнению с фоном) (см. рис. 6).

Лабораторные экспериментальные исследования изменения физических и вещественных свойств горных пород и модельных сред в термоградиентных условиях позволяют отметить следующее.

1. Теплофизические свойства горных пород в условиях повышенных температур, резких градиентов температур и увлажнений значительно изменяются. При этом изменения отдельных физических параметров пород, их вещественных и геолого-минералогических характеристик четко направлены и коррелируются друг с другом определенным образом.

2. Большую роль в процессах изменения физических свойств пород играют неоднородные температурные поля (стационарные и нестационарные). В условиях установившегося температурного градиентного поля в горной массе в конечном итоге формируются зоны измененных пород с неоднородным (зональным) распределением физических свойств, что подчеркивается возникновением в этих условиях вещественной зональности пород.

Не менее важный факт — проявление в термоградиентном поле активизации, мобилизации и движения поровых растворов и веществ

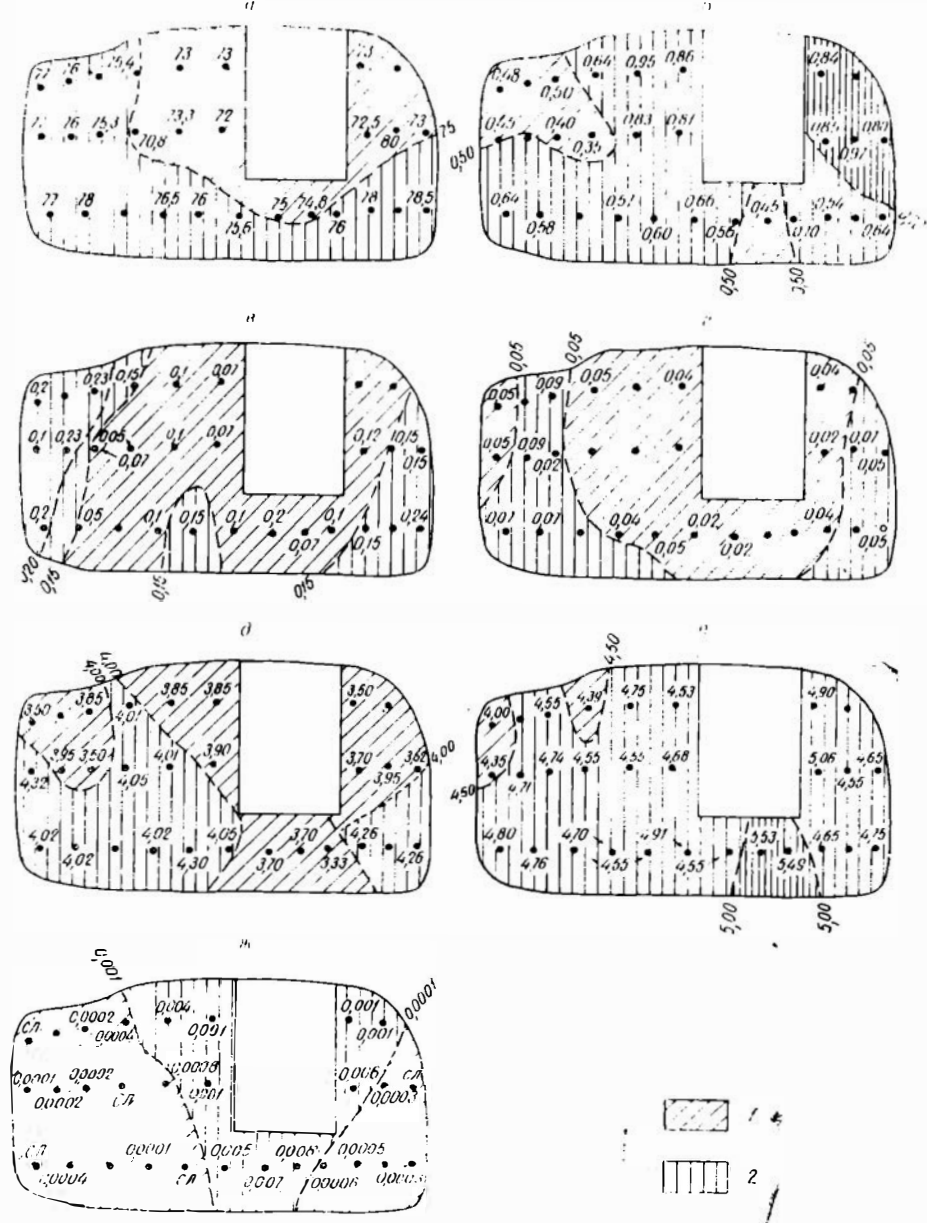


Рис. 6. Изменение химического состава образца гранита после нагревания. Распределение (%): а —  $\text{SiO}_2$ ; б —  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ; в —  $\text{TiO}_2$ ; г —  $\text{MnO}$ ; д —  $\text{Na}_2\text{O}$ ; е —  $\text{K}_2\text{O}$ ; ж —  $\text{Mo}$ . 1 — зоны обеднения; 2 — зоны обогащения.

## Содержание петрогенных компонентов и Мо в граните, %

№ образца	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	Mo
Исходная порода	76,0	0,20	0,65	0,05	4,60	4,02	0,0002
1	77,0	0,20	0,64	0,07	4,80	4,02	Сл.
2	78,0	0,15	0,58	0,07	4,76	4,02	0,0004
4	76,5	0,10	0,57	0,04	4,70	4,02	0,0001
5	76,0	0,15	0,60	0,05	4,55	4,30	Сл.
6	75,6	0,11	0,66	0,02	4,91	4,05	0,0050
7	75,0	0,20	0,56	0,02	4,55	3,70	0,0070
8	74,8	0,07	0,45	—	5,53	3,70	0,0080
9	76,0	0,10	0,70	—	5,49	3,33	0,0006
10	78,0	0,15	0,54	0,04	4,65	4,26	0,0005
12	78,5	0,24	0,60	0,05	4,75	4,26	0,0003
13	77,0	0,10	0,45	0,05	4,35	4,32	0,0001
14	76,0	0,23	0,73	0,09	4,71	3,95	0,0002
15	75,3	0,07	0,40	0,02	4,74	3,50	0,0002
16	70,8	0,05	0,35	—	4,55	4,05	Сл.
17	73,3	0,10	0,83	—	4,55	4,01	0,0008
18	72,0	0,07	0,81	—	4,68	3,90	0,0010
19	77,0	0,20	0,48	0,05	4,00	3,50	Сл.
20	76,0	0,23	0,50	0,09	4,55	3,85	0,0002
22	75,4	0,15	0,64	0,05	4,39	4,01	0,0004
23	73,0	0,10	0,95	—	4,75	3,85	0,0040
24	73,0	0,07	0,86	0,04	4,53	3,85	0,0010
25	72,5	0,12	0,85	0,02	5,06	3,70	0,0060
26	80,0	0,15	0,97	0,07	4,55	3,95	0,0003
27	73,0	0,15	0,80	0,05	4,65	3,62	Сл.
28	73,0	—	0,84	0,04	4,90	3,50	0,0010

Примечание. Аналитики М. И. Зеркалова, А. С. Суражко, Л. Г. Изюмова.

ва пород. Сочетание дифференциации физических свойств пород и активизации подвижности приводит к перераспределению вещества породы, к концентрации его в определенных теплофизических элементах среды (зон фазовых превращений, максимального прогрета, резких градиентов  $P$ ,  $T$  и др.); к возникновению вещественной и физической зональности и т. д.

### ТЕРМОГРАДИЕНТНОЕ ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕ КОМПОНЕНТОВ ГРАНИТА ПРИ ИНТЕНСИВНОМ НАГРЕВАНИИ

Если первые эксперименты по изучению активизации и перераспределения компонентов вмещающих пород в термоградиентном поле проводились преимущественно на увлажненном сыпучем материале в стеклянных трубках, плоских и цилиндрических сосудах, а также на цилиндрическом образце из смеси песка и цемента, приготовленном на растворе солей ряда рудных элементов, то в дальнейшем эксперименты были перенесены на монокристаллические образцы, что приблизило их к природным эндогенным процессам.

Уже в опыте с образцом мелкозернистого аляскинского гранита из Сорского молибденового месторождения (Дударев, Сотников, 1971), нагрев которого (максимально до 170°) осуществлялся нагревателем, введенным в образец, отмечалось, хотя и незначительное, перераспределение некоторых петрогенных элементов, а также зональное распределение Мо (образец помещался в раствор 0,01 н.  $(\text{NH}_4)_2 \cdot \text{MoO}_4 + 0,1$  н.  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) в граните с преимущественным образованием повы-

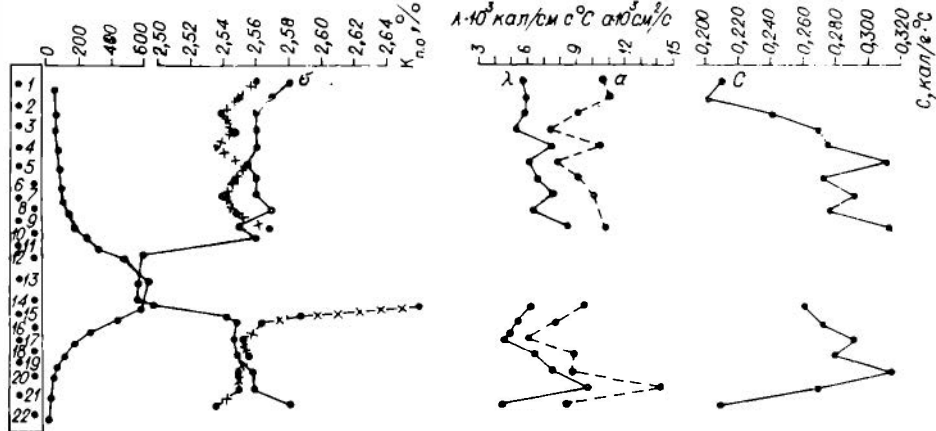


Рис. 7. Изменение физических свойств гранита после интенсивного нагревания.  
1—22 — номер пробы.

шенных концентраций в участках максимального прогрева. Однако мощность источника и циркуляция раствора в образце оказались явно недостаточными, чтобы вызвать более ошутимое перераспределение компонентов породы.

Это и было учтено при постановке эксперимента с керном порфировидных гранитов из Амуджиканского массива (Восточное Забайкалье), в пределах которого локализуется молибденовое оруденение. Длина керна — 93 см, диаметр — 42 мм. Нижний торец керна помещался в кювету, куда по системе сообщающихся сосудов постоянно поступал 0,5 н. раствор HCl. Этот же раствор периодически подводился и к верхнему торцу керна. Керн в вертикальном положении помещался

Таблица 5

Распределение температур по керну, °C

№ термопары	Время замеров								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	40	46	44	49	48	46	50	—	44
2	43	50	49	52	50	49	53	—	46
3	45	54	53	56	55	53	58	—	52
4	50	60	61	63	60	60	64	—	60
5	60	70	70	72	70	70	73	—	70
6	74	86	86	90	87	84	90	—	86
7	90	103	103	105	103	100	106	—	104
8	112	127	126	129	125	124	130	—	125
9	154	170	170	172	170	166	173	—	160
10	217	240	242	243	238	234	244	—	210
11	340	345	347	347	326	313	330	—	350
12	440	510	504	509	460	450	476	426	396
13	530	622	622	628	615	606	625	630	575
14	455	553	554	562	548	540	557	577	525
15	355	436	437	445	434	425	444	482	450
16	220	268	269	274	270	265	275	232	260
17	138	165	168	172	167	165	171	177	165
18	90	110	115	117	116	115	119	121	110
19	63	80	82	83	82	81	84	83	80
20	50	60	66	67	65	65	66	67	63
21	30	35	39	40	40	40	40	41	40
22	24	29	31	33	34	34	33	33	35

Примечание. Время замеров температур 26 февраля: 1—12 ч, 2—13 ч 30 мин; 3—20 ч 00 мин; 27 февраля: 4—2 ч 30 мин; 5—8 ч 00; 6—11 ч 00; 7—17 ч 00 мин; 28 февраля: 8—18 ч 00 мин; 9—8 ч 30 мин.

в цилиндрическую печь. По всей длине в керн вводились термопары (на глубину 21 мм).

Керн непрерывно нагревался в течение 78 ч. При этом уже через 1 ч установился практически постоянный температурный режим с максимальной температурой в центральной части нагревателя до 628°C (табл. 5, рис. 7).

За время эксперимента через нижнюю торцовую часть керна было введено 310 мл раствора, что позволяет оценить эффект «теплового всасывания» (около 4 мл/ч). Граница промачивания фиксировалась визуально по резкому потемнению породы и в процессе эксперимента располагалась на 2—3 см выше уровня раствора в кювете (в районе термопар 20—21). Количество раствора, поступившего через верхний торец, незначительно.

В ходе эксперимента граниты испытали освещение и непосредственно в пределах очага нагревания — разрыхление. Наиболее интенсивное освещение зафиксировано как в области нагревания, так и на участках, примыкающих к нагревателю сверху (интервал 9—10) и снизу (интервал термопар 16—17). Под нагревателем граниты осветлены сильнее, практически до границы промачивания. Вверху освещение развивается до термопар 4—5. Процесс осветления гранитов идет преимущественно по основной массе гранитов (особенно в верхней половине керна), оставляя без изменения калиевые полевые шпаты. И только в областях интенсивного изменения калишпаты несколько осветляются.

После завершения эксперимента керн был распилен на 22 блока (соответственно термопарам), которые послужили основой для изучения физико-механических, теплофизических, петрографических и химических преобразований, имевших место в процессе нагревания керна.

### Физико-механические и теплофизические преобразования

Образец порфиroidного биотитового гранита в результате одновременного нагревания и пропитки претерпел значительные физические изменения (табл. 6, см. рис. 7). Рассмотрим особенности их изменения.

Таблица 6

Физические свойства гранита после нагревания

№ образца	$\sigma$ , г/см <sup>3</sup>	$K_{п.о}$ , %	$c$ , кал/г·°C	$\lambda \cdot 10^{-3}$ , кал/см·с·°C	$\alpha \cdot 10^{-3}$ , см <sup>2</sup> /с	$T$ равно-весная, °C
1	2,58	0,94	0,210	5,7	10,6	50
2	2,57	1,02	0,200	5,9	11,0	55
3	2,56	0,79	0,248	5,8	9,2	60
4	2,56	0,93	0,270	5,3	7,2	70
5	2,56	0,76	0,275	7,5	10,5	80
6	2,55	1,06	0,330	6,1	7,7	95
7	2,56	0,96	0,270	6,5	9,2	100
8	2,56	0,83	0,290	7,5	10,1	130
9	2,57	0,94	0,275	6,3	9,2	170
10	2,55	1,34	0,315	8,1	10,7	245
15	2,49	3,18	0,260	6,2	9,6	450
16	2,54	1,30	0,271	5,4	7,7	280
17	2,55	1,05	0,290	4,7	6,1	175
18	2,55	1,11	0,280	6,3	8,9	120
19	2,55	1,00	0,325	7,6	8,8	80
20	2,56	1,00	0,270	9,8	14,1	60
21	2,56	0,76	0,210	4,5	8,6	40

Плотность породы заметно уменьшается в интервале, располагающемся в пределах очага нагревания (до 2,40 г/см<sup>3</sup>). За пределами нагревателя плотность остается более или менее постоянной (2,55—2,56 г/см<sup>3</sup>) и только в областях увлажнения (вверху и внизу керна) она возрастает до 2,58 г/см<sup>3</sup>.

Открытая пористость порфиroidного биотитового гранита изменяется в пределах 0,76—3,18%, на графике кривая этой пористости сохраняет форму кривой распределения температур нагревания керна с наибольшими локальными отклонениями. В зоне нагре-

Примечание. В образцах 11—14 и 22 физические параметры не определялись.

ва 400°C и больше пористость гранита возрастает в 3 раза по сравнению с ее исходными величинами.

Удельная теплоемкость гранита возрастает в пробах, подвергшихся большему нагреванию. В верхней части керна (обр. 1, 2) и внизу (обр. 21) теплоемкость гранита лежит в пределах 0,200—0,210 кал/г·°С. Затем резко возрастает (у обр. 3 она равна 0,240 и у обр. 4—0,270 кал/г·°С). То же самое наблюдается и в нижней зоне керна. Максимальные значения теплоемкости достигаются в обр. 6 (0,310) и 19 (0,315). Средняя теплоемкость у гранита, прогретого до 80°C, равна 0,290 кал/г·°С. Общее приращение теплоемкости достигает, таким образом, 0,115 кал/г·°С (или больше 50% от исходной). Локальные максимумы теплоемкости наблюдаются в образцах 6 ( $T=95^\circ\text{C}$ ;  $C=0,311$  кал/г·°С); 8 ( $T=130^\circ\text{C}$ ,  $C=0,290$  кал/г·°С), 10 ( $T=245^\circ\text{C}$ ,  $C=0,311$  кал/г·°С), 17 ( $T=175^\circ\text{C}$ ,  $C=0,291$  кал/г·°С) и 19 ( $T=80^\circ\text{C}$ ,  $C=0,313$  кал/г·°С).

Тепло- и температуропроводность. Теплопроводность изменяется от 4,7 до 9,7 кал/см·с·°С. В верхней части керна (над нагревателем) теплопроводность постепенно растет и с приближением к зоне нагрева увеличивается от 5,7 до  $8,3 \cdot 10^{-3}$  с локальными максимумами и минимумами. Приращение теплопроводности в локальных экстремумах достигает  $1,5—2,5 \cdot 10^{-3}$  кал/см·с·°С. Ход изменения теплопроводности в нижней части керна (под нагревателем) несколько отличается. Здесь, с приближением к нагревателю, сначала теплопроводность резко возрастает (обр. 20,  $\lambda=9,8 \cdot 10^{-3}$ ), затем снижается до  $4,7 \cdot 10^{-3}$  (обр. 17,  $T=175^\circ\text{C}$ ) и вновь несколько возрастает в точке 15 ( $\lambda=6,1 \cdot 10^{-3}$ ,  $T=440^\circ\text{C}$ ). Под нагревателем образуются две экстремальные зоны, расположенные рядом, максимум ( $\lambda=9,8 \cdot 10^{-3}$ ) и минимум ( $\lambda=4,7 \cdot 10^{-3}$ ). Скачок теплопроводности достигает  $5 \cdot 10^{-3}$  кал/см·с·°С.

Коэффициент температуропроводности изменяется аналогичным образом, в интервале  $6,1—14,1 \cdot 10^{-3}$  см<sup>2</sup>/с.

Сравнение трех теплофизических параметров — теплоемкости, тепло- и температуропроводности — позволяет отметить, что, как правило, максимум теплоемкости соответствует локальным минимумам тепло- и температуропроводности. Следует подчеркнуть, что нагревание гранита сопровождается образованием специфических теплофизических зон, характеризующихся свойствами либо аккумуляторов тепла (зоны повышенных  $C$  и пониженных  $\lambda$  и  $a$ ) — образцы 6, 17, 19 —, либо зоны с повышенными теплопроводными свойствами (теплоемкость минимальна, тепло- и температуропроводность максимальны) — точки 2, 15, 18. В ряде участков, однако, наблюдается прямая пропорциональность между всеми теплофизическими характеристиками (точки 8, 10, 21).

### Минеральные преобразования гранита и перераспределение его компонентов

Граниты в пределах нагревателя испытывают значительное осветление, минералогически выражающееся в развитии каолинита по плагиоклазу и гидратации биотита. Калиевый полевой шпат остается преимущественно без изменения, только в единичных случаях зерна его с периферии замещаются каолинитом. Сфен лейкоксенизируется, магнетит замещается гематитом. При эксперименте в раствор HCl компоненты не вводились. Поэтому все отмечаемые после опыта изменения содержания отдельных компонентов в границе (рис. 8, табл. 7) обусловлены перераспределением вещества породы в неоднородном тепловом поле.

**Молибден.** Среднее содержание Mo в исходной породе —  $3,3 \cdot 10^{-4}\%$  при относительно равномерном его распределении.

После эксперимента распределение Mo по керну становится резко неравномерным. В большинстве проб содержание его ниже среднего

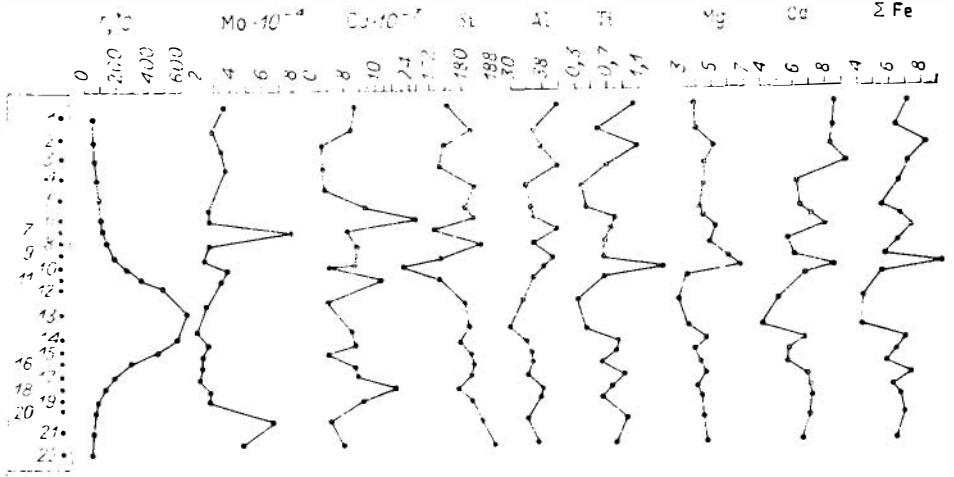


Рис. 8. Изменение вещественного состава гранита  
1—22 — номер пробы

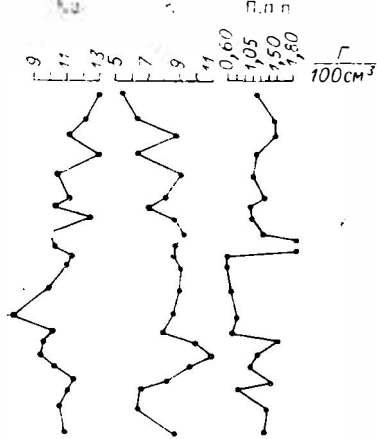
значения: обычно  $2,3\text{--}2,6 \cdot 10^{-4}\%$ , что особенно заметно в пределах очага нагрева зерна. Именно здесь (в районе термопар 13, 14, где температура достигала  $630^\circ\text{C}$ ) зафиксировано минимальное содержание элемента ( $1,9 \cdot 10^{-4}\%$ ). Относительно понижено содержание Мо и под нагревателем, до термопар 18, 19, находящихся вблизи изотермы  $100^\circ\text{C}$ . В районе последней его содержание увеличивается с 2,4 до  $2,6 \cdot 10^{-4}\%$ , а затем в районе термопар 20—21 (вблизи границы промачивания) резко возрастает до  $6,6 \cdot 10^{-4}\%$  и, наконец, около нижней торцевой части зерна (район термопары 22) снижается до  $4,6 \cdot 10^{-4}\%$ .

Над нагревателем общее содержание Мо несколько выше. Здесь фиксируются три зоны относительно повышенных содержаний элемента и отмечен абсолютный максимум ( $7,7 \cdot 10^{-4}\%$ ) на участке с температурой около  $100^\circ\text{C}$  (район термопар 7, 8). Нижняя зона относительно повышенных содержаний располагается непосредственно в верхней части нагревателя (в районе термопар 10—12); средняя — в районе термопар 3—5 ( $T$  около  $50\text{--}70^\circ\text{C}$ ) и, наконец, верхняя — у торцевой части, в области верхнего увлажнения зерна.

В целом довольно отчетливо фиксируются вынос этого элемента из зоны максимального нагревания и концентрация его в областях фазовых границ: вблизи границы промачивания (в нижней части зерна) и особенно на участке парообразования над нагревателем.

**Медь** (среднее содержание в исходных породах —  $9,6 \cdot 10^{-3}\%$ ) после нагревания также распределяется неравномерно. При общем сходстве кривых распределения Си и Мо по керну отмечаются и некоторые различия. В частности, абсолютный максимум содержания Си ( $25,6 \cdot 10^{-3}\%$ ), также отмеченный над нагревателем, несколько более удален от последнего (район термопар 6, 7). С другой стороны, нижний максимум Си ( $20,4 \cdot 10^{-3}\%$ ) относительно повышенных содержаний Мо несколько сдвинут к нагревателю (район термопар 18, 19). Более отчетливо проявляется зона повышенных содержаний Си в верхней части нагревателя (пространственно она совпадает с участком проявления повышенных количеств молибдена). Средней зоне повышенных содержаний Мо (над нагревателем) соответствует отчетливо выраженный минимум Си (вынос здесь более значительный, чем из области максимального нагревания). Как и в случае с Мо, в верхней торцевой части зерна (в области увлажнения) содержание Си несколько увеличивается.

Если основываться на абсолютно максимальных концентрациях элементов (отмечаемых над нагревателем), то можно говорить о некотором удалении Си от очага нагрева. Близкие результаты распределения



после интенсивного нагревания

Си и Мо получены в предыдущих опытах (Сотников, Дударев, 1971). Формирование этих максимумов происходило, очевидно, за счет выноса элементов из области нагревания (для Мо это проявлено отчетливее) и стягивания их из верхних участков, за пределами изотермы 100°C. Миграция в зону относительно повышенных температур отчетливее выражена для Си.

Под нагревателем в отличие от Мо перераспределение Си менее отчетливо. Однако и здесь постоянно отмечается чередование участков с различным содержанием элемента, но отклонения от среднего содержания (в исходных породах), за исключением максимума в районе термопар 18, 19, как правило, незначительные.

Распределение **кремнезема** ( $\text{SiO}_2$ ) в керне после нагревания становится неравномерным, особенно значительны колебания его содержания в области нагрева. Именно здесь отмечены абсолютно минимальные количества кремнезема и один из максимумов. Абсолютный минимум располагается непосредственно в верхней части очага нагрева и выше (в районе термопар 8—9, температурный интервал 125—173°C), сменяясь зоной повышенных содержаний  $\text{SiO}_2$  (один из двух наиболее четко проявленных максимумов). Интересно, что выше над максимумом также отчетливо проявлена зона пониженных содержаний  $\text{SiO}_2$  (второй по значимости минимум).

Над нагревателем выделяются еще две зоны с повышенными содержаниями  $\text{SiO}_2$ , из которых более четко проявлена зона в районе термопар 4—7. Это область, располагающаяся вблизи изотермы 100°C.

Таблица 7  
Перераспределение компонентов гранита в тепловом поле (%)

№ образца	$\sigma$ , г/см <sup>3</sup>	$\text{SiO}_2$	$\text{TiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{MgO}$	$\text{CaO}$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$ , сумма	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{K}_2\text{O}$	П.п.п.	Мо· ·10 <sup>-4</sup>	Си· ·10 <sup>-3</sup>
Исходная порода	2,56	79,0	0,70	35,8	4,4	6,7	6,3	10,8	8,6	1,57	3,3	9,6
1	2,58	76,1	1,03	41,5	3,9	8,5	7,0	15,0	5,4	1,14	3,6	10,3
2	2,57	81,8	0,56	35,6	4,0	8,4	6,3	12,2	6,3	1,44	3,1	9,5
3	2,56	75,4	1,08	37,4	5,0	8,2	8,1	22,2	9,0	1,48	2,8	2,6
4	2,56	74,1	0,66	41,1	4,4	9,2	7,0	13,1	6,5	1,13	3,8	2,6
5	2,56	83,0	0,36	33,7	4,4	6,1	6,4	10,6	9,2	1,08	3,1	2,6
6	2,55	80,5	0,41	34,8	4,2	6,3	5,3	11,3	8,2	1,28	2,6	12,8
7	2,56	82,5	0,77	35,3	4,4	7,0	6,4	10,4	7,2	1,02	2,6	25,6
8	2,56	72,9	0,72	41,0	5,2	7,8	7,2	12,6	8,7	1,08	7,7	8,2
9	2,57	84,4	0,64	35,0	4,8	5,5	6,3	10,0	9,4	1,28	2,6	10,8
10	2,55	74,7	0,61	40,0	6,0	5,9	5,5	10,3	8,8	2,60	2,3	10,2
11	2,56	65,1	1,36	37,9	6,6	8,4	9,2	11,4	8,8	0,61	3,6	3,6
12	2,45	74,0	0,64	35,3	3,3	6,5	5,3	11,1	9,2	0,59	3,4	17,2
13	2,45	80,0	0,29	32,7	2,8	4,9	4,1	10,0	9,1	0,69	2,4	3,7
14	2,40	81,2	0,38	28,8	3,4	3,9	3,9	7,8	8,7	0,82	1,9	9,1
15	2,49	79,3	0,80	32,9	4,6	6,5	6,7	10,4	8,1	0,70	2,5	10,4
16	2,54	81,6	0,76	34,2	3,8	5,5	6,1	9,8	9,9	1,57	2,3	3,8
17	2,55	82,3	0,59	34,7	4,2	5,5	5,5	9,7	11,2	1,17	2,3	10,2
18	2,55	81,8	0,87	33,9	4,5	6,6	7,1	10,5	9,8	1,07	2,0	10,7
19	2,55	78,5	0,71	36,9	4,0	6,8	6,0	11,7	8,5	1,48	2,6	20,4
20	2,56	81,9	0,61	36,4	4,3	6,9	6,4	11,4	6,7	0,87	2,6	12,8
21	2,56	84,3	0,90	33,5	4,4	6,8	6,6	10,8	6,6	1,38	6,6	4,1
22	2,58	87,0	0,77	36,3	4,6	6,3	6,2	11,1	9,0	1,34	4,6	7,7



Абсолютный максимум содержания  $\text{Si}_2\text{O}$  располагается в нижней торцевой части зерна. При этом увеличение его количества начинается от района термпар 18, 19 (температурный интервал 84—119°) и резко возрастает в области увлажнения.

Из участка зерна, расположенного в пределах нагревателя, кремнезем в целом выносятся. Однако практически вынос фиксируется только для района верхней половины нагревателя, выше точки максимальных температур (термопара 13). Ниже содержание  $\text{SiO}_2$  в породе близко к исходному.

Отмеченную непосредственно для очага нагрева тенденцию в перераспределении  $\text{SiO}_2$  можно распространить и на весь керн. Для верхней половины зерна (выше точки максимального нагрева) более характерен его вынос (среднее содержание компонента после эксперимента здесь становится ниже его среднего количества), в нижней половине количество  $\text{SiO}_2$  возрастает, в верхней части зерна он распределен более неравномерно.

Зона максимального выноса **окси алюминия** ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) также тяготеет к очагу нагрева, но по сравнению с зоной выноса  $\text{SiO}_2$  она проявлена менее резко и располагается в области более высоких температур (445—628°C). В целом намечается противоположная тенденция в перераспределении  $\text{Al}_2\text{O}_3$  по сравнению с распределением  $\text{SiO}_2$ . В частности, ряду минимумов содержаний  $\text{SiO}_2$  соответствуют повышенные количества  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и наоборот. Так, в зоне абсолютного минимума кремнезема (район термпар 8, 9) фиксируется один из максимумов содержаний  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , а расположенному выше максимуму  $\text{SiO}_2$  соответствует минимум содержания  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Эта зависимость прослеживается выше по керну, элементы ее отмечают и для нижней половины зерна.

В области высоких температур (больше 400°C) располагается также зона наибольшего выноса **окси титана** ( $\text{TiO}_2$ ). В верхней части нагревателя (в районе термпар 10, 11 температурный интервал — 244—347°C) эта зона сменяется узкой зоной с резко выраженным максимумом содержаний компонента (это абсолютный максимум  $\text{TiO}_2$ ). По пространственному положению данный максимум совпадает с абсолютным минимумом  $\text{SiO}_2$  и близок к зоне относительно повышенных содержаний  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

Другая зона выноса  $\text{TiO}_2$  (проявленная менее отчетливо) располагается выше нагревателя (в районе термпар 4—6; над изотермой 100°C) и к торцевой части зерна сменяется зонами заметно повышенных содержаний компонента.

Распределение  $\text{TiO}_2$  в нижней половине зерна относительно более равномерное с локальными незначительными отклонениями от средних исходных величин (обычно в сторону увеличения). Распределение **окси магнезия** ( $\text{MgO}$ ) более равномерное. Однако и для него отчетливо фиксируется зона выноса (в области высоких температур > 400°C), которая на графике по своей конфигурации очень близка зоне выноса  $\text{TiO}_2$ , и зона заметного повышения содержаний, пространственно также совпадающая с абсолютным максимумом  $\text{TiO}_2$ .

Распределение **окси кальция** в породе имеет много общего с содержанием  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{TiO}_2$ . Это касается как положения зоны максимального выноса (в области температур > 400°C), так и распределения максимальных содержаний  $\text{CaO}$ , полностью расположенных над нагревателем. Здесь выделяются три зоны с относительно повышенными количествами  $\text{CaO}$ , разделенные зонами выноса, в которых содержание компонента ниже его исходных количеств, но постоянно остается выше содержания  $\text{CaO}$  в зоне максимального выноса. В нижней половине зерна при равномерном распределении оно близко исходному.

**Железо** (суммарное, в пересчете на  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) по характеру перераспределения имеет много общего с  $\text{TiO}_2$  и  $\text{CaO}$ . Для него также в области

высокий вынос ( $>400^{\circ}\text{C}$ ) хорошо фиксируется зона максимального выноса, пространственно и по конфигурации графика близкая к особенностям выноса  $\text{TiO}_2$  и  $\text{MgO}$ . Отчетлива узкая зона абсолютно максимального содержания суммарного  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , как и других элементов, приуроченная к верхней части нагревателя (область температур  $244\text{—}347^{\circ}\text{C}$ ). В верхней половине зерна отмечены другие зоны повышенных содержаний  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Особенно четкая, как и для  $\text{TiO}_2$ , зона в районе термопар 2, 3. Максимум подобной зоны  $\text{CaO}$  несколько сдвинут вниз, к нагревателю (в район термопар 3, 4). В нижней части зерна распределение  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  более равномерное.

С заметным выносом из зоны нагревания перераспределяется и **окись натрия** ( $\text{Na}_2\text{O}$ ), распределение ее (см. рис. 8) после нагревания довольно близко к распределению  $\text{CaO}$ , что отчетливо фиксируется как по положению зоны абсолютного минимума (в районе термопар 13, 14), так и по положению других зон относительно повышенных и пониженных содержаний элемента (особенно в верхней половине зерна). Как и в случае с  $\text{CaO}$ , абсолютный максимум содержания приходится не на верхнюю часть зоны нагрева (что отмечалось для большинства других компонентов гранита), а на район термопар 4, 5. Приближается к абсолютному максимуму содержание  $\text{Na}_2\text{O}$  в верхней торцевой части зерна, а также в районе термопар 7, 8 (область температур  $100\text{—}130^{\circ}\text{C}$ ). Последнее фиксируется и на графиках распределения  $\text{CaO}$ . В других случаях отклонения содержаний  $\text{Na}_2\text{O}$  от средних (исходных) величин незначительны. Это касается и зоны в верхней части нагревателя, где отмечено незначительное возрастание количества  $\text{Na}_2\text{O}$ .

Таким образом, в случае  $\text{Na}_2\text{O}$  по сравнению с рассмотренными элементами можно говорить о значительно большем пути миграции от очага нагрева до увлажняемой торцевой части зерна.

Совершенно иной характер носит перераспределение **окси калия** ( $\text{K}_2\text{O}$ ). В пределах очага нагрева содержание  $\text{K}_2\text{O}$  по зерну более или менее постоянно, оно незначительно превышает среднее исходное. И только в самой нижней части зоны нагревания порода резко обогащается  $\text{K}_2\text{O}$  (район термопар 15—18, область температур около  $200^{\circ}\text{C}$ ). Ниже изотермы  $100^{\circ}\text{C}$  располагается область заметного выноса  $\text{K}_2\text{O}$  и только в нижней торцевой части зерна содержание его приближается к среднему исходному; в верхней половине зерна содержание  $\text{K}_2\text{O}$  практически постоянно ниже среднего. При этом отмечены три зоны пониженных количеств с наибольшим выносом из верхней торцевой части зерна, где располагается абсолютный минимум.

Распределение **потерь при прокаливании** (П. п. п.) после нагревания резко неравномерное: абсолютный минимум приходится на область максимального нагревания, отчетливо вписываясь между изотермами  $400^{\circ}\text{C}$ . За пределами этих изотерм количество летучих веществ заметно возрастает, достигая абсолютного максимального значения в верхней части зоны нагревателя (в районе термопар 9, 10, область температур  $173\text{—}244^{\circ}\text{C}$ ). Значительно менее проявленный максимум П. п. п. фиксируется и в нижней части нагревателя (здесь он несколько сдвинут в сторону более высоких температур). В других частях зерна при общем неравномерном распределении п. п. п. их содержание постоянно ниже средней исходной величины. Общее количество п. п. п. в зерне после эксперимента сократилось.

Таким образом, в процессе неоднородного нагревания зерна порфировидных биотитовых гранитов (максимальный нагрев до  $630^{\circ}\text{C}$ ) с подводом к его нижней и верхней торцевой частям 0,5 н раствора  $\text{HCl}$  порода претерпела существенные химические, минералогические и физико-механические изменения. Максимальные преобразования зафиксированы для участка зерна, расположенного непосредственно в пределах нагревателя, существенные — отмечены также в районе фазовых границ.

В частности, на графиках кривая изменения открытой пористости во многом повторяет кривую распределения температур нагревания. График изменения плотности практически является зеркальным отражением последней.

Графики изменения удельной теплоемкости, тепло- и температуропроводности имеют более сложную конфигурацию. В частности, для теплоемкости, кроме увеличения ее значений в зоне нагрева, фиксируются максимумы в верхней и нижней половинах керна, в районе изотермы 100°C.

Минералогические преобразования в породе при эксперименте близки к преобразованиям, происходящим при аргиллизации кислых гранитоидных пород. Много общего они имеют с преобразованиями, отмеченными С. Г. Чернорук, Ю. В. Казыцыным и др. (1970) при экспериментальном воспроизведении фаций аргиллизированных пород.

Перераспределение компонентов гранита в процессе эксперимента обычно характеризуется их выносом из зоны максимального нагревания с преимущественной концентрацией в верхней половине керна (над нагревателем). Исключения составляют калий, содержание которого в районе нагревателя в основном сохраняется, и кремний, зона абсолютно минимальных содержаний которого сдвигается в верхнюю часть нагревателя. Эта зона минимальных содержаний кремния пространственно совпадает с зонами привноса большинства других петрогенных элементов (Ti, суммарного железа, Ca, Mg). Здесь же располагается и зона максимального содержания летучих (п. п. п.).

В распределении зон повышенных содержаний компонентов (особенно рудных) значительную роль играют фазовые границы, являясь своеобразными концентраторами вещества.

## **ЭНДОКЛАВНЫЕ МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕПЛО-МАССОПЕРЕНОСА В ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СРЕДАХ**

Проточные схемы и устройства для моделирования природных геологических процессов, предложенные различными исследователями (Сыромятников, 1950, 1955; Хитаров, Лебедев, 1962; Феодотьев, 1962; и др.), устроены по общему принципу — образец горной породы помещается в толстостенный металлический стакан (бомба, автоклав) и герметически закрывается в нем. Вся эта система нагревается до нужной температуры внешним или внутренним нагревателем. Предусмотрен отбор отработанного раствора во время эксперимента. Усовершенствование подобных систем идет по пути улучшения способов нагревания образцов, их закрепления, создания давления и т. д.

Опыт работы на подобных проточных системах показал, что они обладают рядом ограничений, обусловленных принципами их устройства, из-за которых до сих пор не удавалось удовлетворительно провести многие измерения физических и химических параметров образцов или моделируемых процессов в ходе эксперимента:

1. Непосредственный доступ к образцу во время проведения опыта закрыт.

2. Создание больших перепадов (градиентов) температур в одном направлении затруднено. Замерить теплообменные характеристики пород невозможно.

3. Создание направленного потока раствора и, тем более, энергии образца через его торцевую поверхность затруднено. Обычно образец омывается рабочим раствором со всех сторон.

Чтобы устранить эти недостатки, нами разработана принципиально новая схема моделирования гидротермальных и пневматолитовых

процессов — термоградиентный проточный высокотемпературный эндоклав. Эта схема позволяет работать с большими образцами пород различной формы объемом от 0,5 дм<sup>3</sup> до 1 м<sup>3</sup> и более в лабораторных условиях и до  $n \cdot 10$ — $n \cdot 1000$  м<sup>3</sup> в условиях естественного залегания пород. Во время эксперимента практически вся поверхность и объем монолита пород остаются открытыми. Это дает возможность проводить широкие исследования разнообразных физических и химических свойств породы во время опыта. Устройство позволяет создавать радиальные и вертикальные градиенты температур от 0 до 100—150°C и более на 1 см с локальным нагревом до 1000°C и больше.

### Устройство проточного «эндоклава»

Принцип устройства и основные узлы эндоклава показаны на рис. 9. Стенкой «автоклава» служит сама горная порода. Образец горной породы (кern из скважины, штуф и т. п.) с отверстием для центральной трубки (4) помещается между двумя массивными плитами (1) и несколькими болтами (3), прочно закрепляется в основаниях. Между образцом породы и основаниями располагаются различные герметизирующие и амортизирующие прокладки (2) из паранита, асбоцемента, асбеста и др. Для того чтобы создать вертикальную степень свободы у образца, что важно при нагревании, между основанием и образцом во второй модели эндоклава (эндоклав без металлической центральной трубки) помещался сильфон или упругая пружина. Температурный режим образца создается и поддерживается селитовым нагревателем (10), который помещался или в центральную трубку (модель 1), или в рабочую полость образца. Центральная трубка изготавливается из жаропрочной стали, диаметр ее на 1—2 мм меньше отверстия в образце. Этот зазор между трубкой и образцом служит рабочей камерой для раствора. Размеры и мощность нагревателя зависят от объема образца и требуемых максимальных температур нагрева. Селитовый нагреватель позволяет легко получить в центре образца (в рабочей камере) температуру до 1000°C и более.

Центральное положение нагревателя в образце позволяет создавать радиальное температурное поле с различными градиентами температур

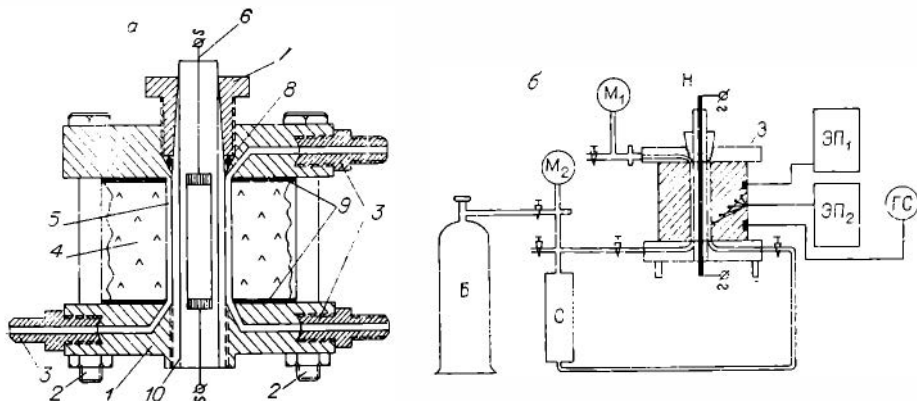


Рис. 9. Проточная термоградиентная высокотемпературная установка (эндоклав).

*a* — зажим для образца горной породы; 1 — основания; 2 — болты; 3 — вводы для растворов и газов; 4 — образец горной породы; 5 — рабочая камера; 6 — нагреватель; 7 — пробка; 8 — прокладки; 9 — прокладка; 10 — центральная трубка для нагревателя; б — общая схема эндоклава: Б — сжатый газ; С — сосуд для рабочего раствора; М<sub>1</sub>, М<sub>2</sub> — манометры; Н — нагреватель; ЭП<sub>1</sub>, ЭП<sub>2</sub> — потенциометры для записи температур и других физических параметров; ГС — газовый счетчик или газоанализатор; 3 — зажим горных пород.

(от 10 до 100—150°C/см). Для создания еще больших градиентов (300—400°C/см) поверхность образца необходимо охлаждать, что не представляет труда: вверху и внизу установки расположены вводы и выводы (7) для подачи в рабочую камеру газа или раствора. Необходимое давление раствора в рабочей камере поддерживается различными способами (насос, сжатый газ и др.). Для приготовления исходных растворов использовался насытитель (Малинин, 1962).

Принципиально новым и важным в схеме является то, что стало возможным изучать свойства пород во время моделирования того или иного геологического процесса. В частности, непрерывно измерялись градиенты температур, температуры в различных точках образца, проницаемость, тепловые потоки, коэффициенты теплопроводности и общей теплопередачи при совместном действии температур и растворов, электрические параметры и др.

Измерение распределений температур в опытном теле не представляет труда, так как можно поместить любое количество термопар с поверхности образца на разную глубину по различным направлениям (продольные, радиальные и т. п. профили). Данные температур и температурных градиентов записывались автоматически при помощи электронных потенциометров.

Потоки вещества и тепла через поверхность образца измерялись следующим образом. В ходе эксперимента вся поверхность образца является поверхностью тепло- и массообмена. Однако уловить эти суммарные потоки для всей поверхности практически очень сложно. Поэтому применен метод локального отбора тепла или вещества. Для этого на поверхности образца высверливалось отверстие в сторону центральной трубки на определенную глубину, куда помещался датчик потока тепла или вещества: на первых порах — медные калориметры, позднее — тепломеры, изготовленные украинскими теплофизиками (Герашенко и др., 1965). Применение тепломеров дало возможность непрерывно записывать тепловой поток. Труднее с датчиками вещества. В принципе локальный отбор позволяет подключить любой газоанализатор и непрерывно наблюдать за составом и количеством диффундирующих газов. Нами применен лишь волюметрический способ измерения потока вещества.

Варьируя глубины заделки датчиков, изменяя перепады давлений в рабочей камере образца и температурные градиенты, представляется возможным провести исследования тепломассообменных и теплофизических параметров в динамических условиях. Для расширения диапазона рабочих давлений (превышающих пределы прочности пород) применялось частичное закрепление поверхности образца (стягивающие скобы, частичная цементация образца и др.).

При проведении экспериментальных работ на эндоклаве измерялись и рассчитывались следующие параметры: распределение температур и температурные градиенты регистрировались термопарами; тепловые потоки измерялись медными калориметрами. Эффективную теплопроводность пород при разных температурах находили по расчетным формулам (Михеев, Михеева, 1960):

$$\lambda_{\text{э}} = \frac{q_{\text{внешн}} \cdot d_2 \cdot \ln \frac{d_1}{d_2}}{2\Delta T},$$

где  $q_{\text{внешн}}$  — тепловой поток на внешней поверхности,  $d_1$  и  $d_2$  — внутренний и внешний диаметры,  $\Delta T$  — разность температур на внутренней и внешней поверхностях. Рассчитывался также коэффициент полной или суммарной теплопередачи, широко применяемый в технической теплофизике (Арнольд, 1958; Михеев, Михеева, 1960; Хижняков, 1964). В частности, для однослойной цилиндрической стенки при установившемся

тепловом режиме количество тепла, переданное от горячей к холодной стенке, равно:

$$\frac{dq}{dF} = K(t - t_x),$$

где  $\frac{dq}{dF}$  — тепловой поток,  $t$  и  $t_x$  — температуры горячей и холодной поверхности. При этом

$$K = \frac{q}{T}; \quad T = t - t_x.$$

## Глава 2

# АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ НАГРЕВАНИЯ ЛЕССОВИДНЫХ ПОРОД АЛМАЛЫКСКОГО РАЙОНА

## ВЫБОР ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО БЛОКА И ЕГО ИСХОДНЫЕ ГЕОЛОГО-ФИЗИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ

Программой работ предусматривалось проведение начальных исследований на рыхлых породах. Это обусловлено тем, что осуществление эксперимента, его подготовка и разборка блоков после окончания работ в рыхлых породах технически проще. Поэтому летом 1970 г. экспериментальный участок был заложен в лессовых породах в 150 м от разведочного уклона на месторождении Дальнем Алмалыкского района. При выборе блока учитывались следующие условия: хороший подъезд; возможность быстрого подвода электроэнергии; размещения рядом двух модельных блоков; расположение участка вблизи обрыва, что облегчало бы разборку, и т. д.

Практика работ показала целесообразность заложения экспериментальных площадок в рыхлых породах. С минимальными затратами были успешно решены организационные вопросы подготовки и проведения эксперимента — бурение, опробование исходных и конечных продуктов, отработка различных методов измерений физико-химических параметров. С другой стороны, физико-механические и химические особенности рыхлых пород позволили уже в начале работ создать довольно сложную геолого-физическую модель естественной гидротермальной системы (большая проницаемость и увлажненность пород, значительное содержание рассеянных рудных элементов, относительная однородность блока и т. д.).

### Подготовка участка к эксперименту

Экспериментальный блок размером  $20 \times 10 \times 5$  м был разделен на две площадки. На двух площадках (1 и 2; рис. 10) пройдено 67 скважин различной глубины. Из них скажины 6 и 5 были нагревательными; скважины 28—32 служили для введения растворов; в остальных размещались различные измерительные датчики. Большая часть скважин сделана с помощью самоходной буровой установки. Площадка 1 бурилась при сухом режиме (продувка воздухом), а площадка 2 — с раствором, что позволило добиться большего увлажнения площадки 2 и тем самым усложнить эксперимент, проводя его в «сухом» и «влажном» режимах.

Кроме названных на опытных площадках бурились скважины с помощью ручного почвенного бура глубиной до 5 м с целью детального отбора проб грунта на влажность, химический и спектральный анализы. Подобные пробы отбирались также по обрыву площадок (разрезы I,

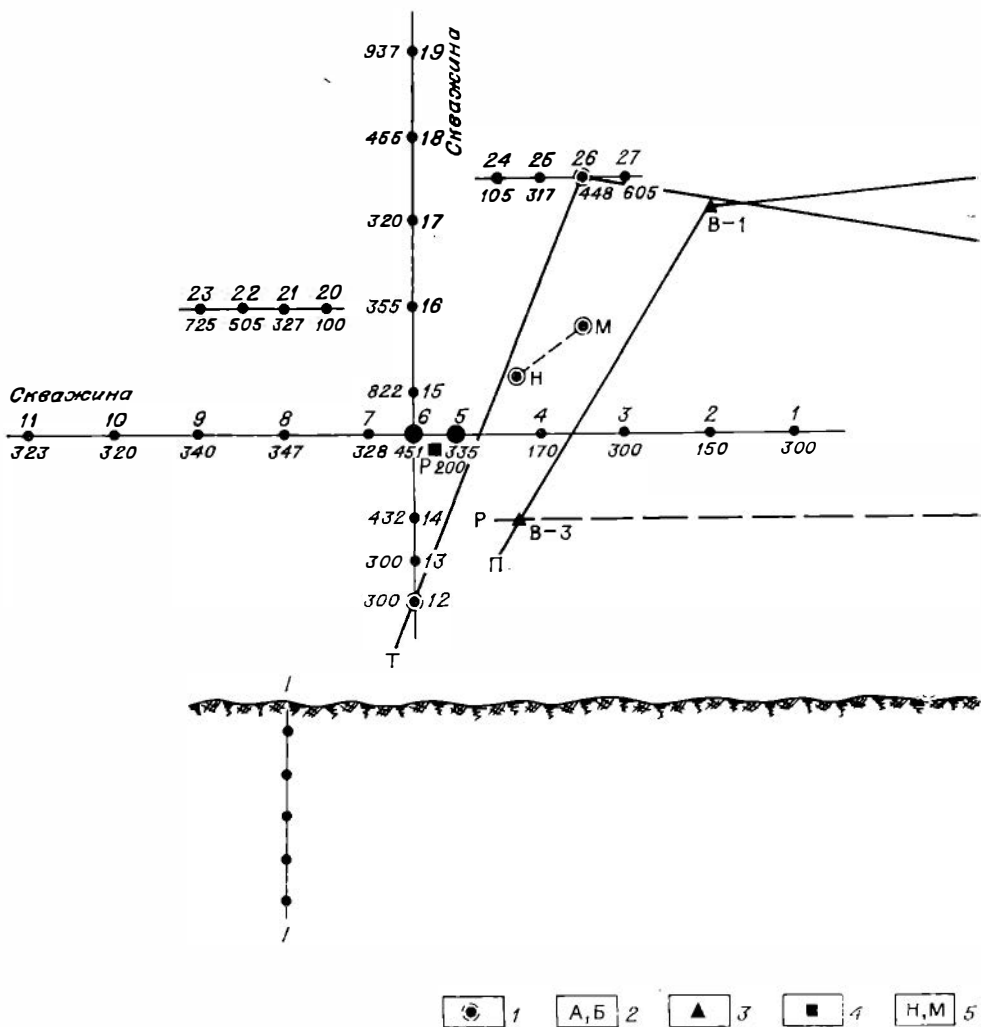


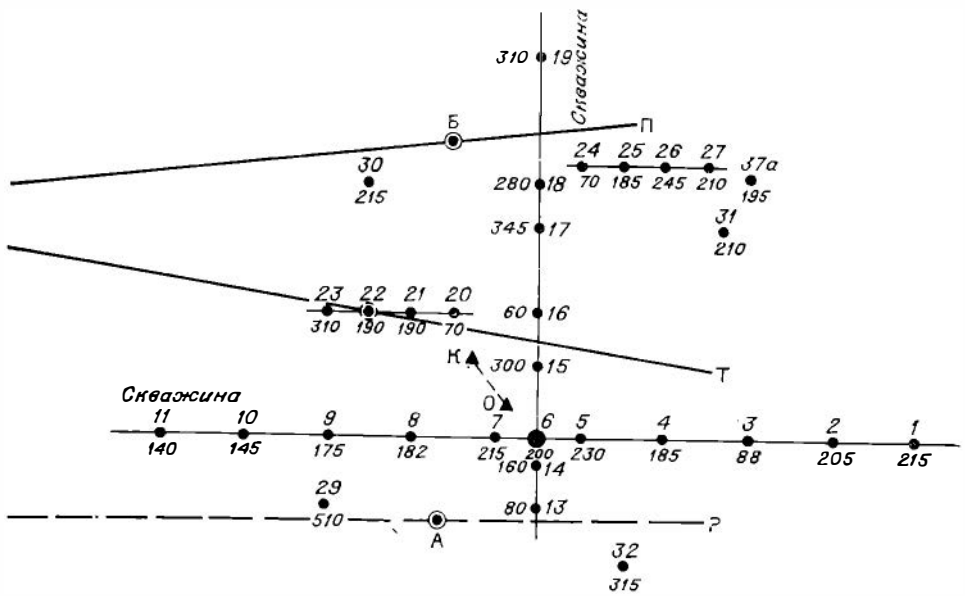
Рис. 10. Схема расположения и разбуривания

1 — исходная влажность и химанализы (пробы 1—47),  $L=5$  м; 2 — после увлажнения (пробы 60—71), да раствора (пробы 72—75),  $L=2$  м; 5 — после прогрева (пробы 509—509),  $L=3$  м; 6 — после прогрева площадок; исходных — 8;

II, III) (см. рис. 10). На основе этих материалов ниже дается общая характеристика физических и вещественных особенностей экспериментального блока.

### Исходные физические и химические особенности опытного блока

Первый экспериментальный блок был заложен в лессовидных породах Алмалыкского района. Это породы серовато-желтого цвета со столбчатой отдельностью и без какой-либо слоистости. Они характеризуются высокой пористостью (до 54%) и водопроницаемостью (до 0.6 м/сут) и содержит большое количество легкорастворимых солей. Известно, что лессы сухого климата могли периодически увлажняться, и в их порах со временем образовался природный раствор, обогащенный растворимыми солями различных химических элементов (в том числе и рудных). Процессы испарения приводили к выпадению солей на по-



0, К 6    I, II, III 7    ТТ 8    ПП 9    РР 10

опытных площадок в блоке лессовидных пород.

$L=3$  м; 3 — влажность и химанализы после увлажнения (пробы 48—59),  $L=3$  м; 4 — скважина для вво- (пробы 510—515),  $L=1,5$  м; 7 — вертикальные разрезы опробования по обрыву площадки; профили после увлажнения — 9, 10.

верхности частиц в виде пленок и включений, цементирующих их.

Известно также, что с увлажнением лесса начинается процесс усадки, т. е. уменьшение объема пород за счет сокращения количества пор. По сообщению Е. А. Замарина, пористость просевшего лесса уменьшается на 5—15%. Одновременно с этим перераспределяются химические элементы.

Особенно важной физической характеристикой в нашем случае является влажность исходных лессов. Этот параметр замерен нами для 74 проб, которые отбирались из скважин ручного бурения через 0,5 м. Влажность определялась весовым методом, путем высушивания образцов до постоянного веса в сушильном шкафу (табл. 8).

Естественная влажность лессов изменяется от 6,06 до 16,1%. По профилю ТТ (рис. 11), включающему скважины 12, 26 и 22, влажность лессов замерена до начала бурения и отражает естественную влажность блока. В этом случае уровень 10%-ной влажности находился



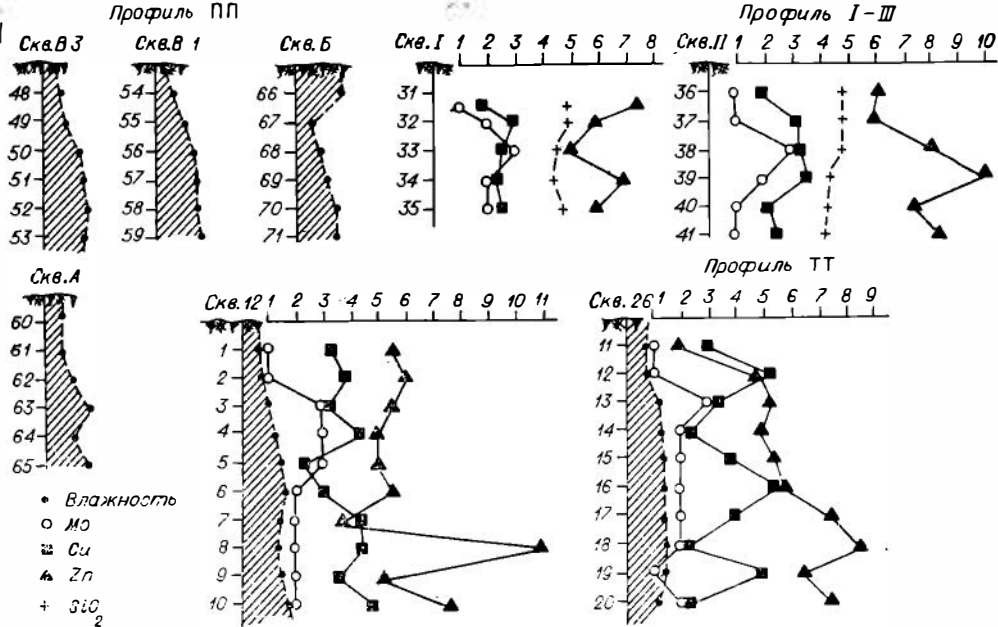
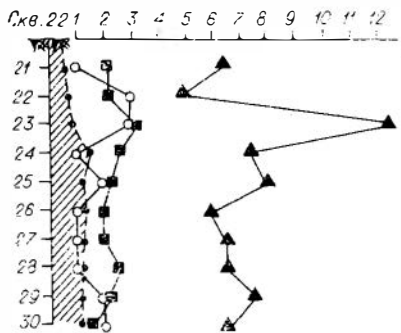
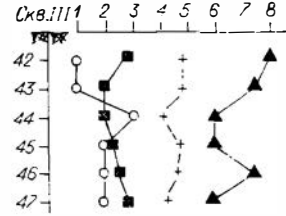


Рис. 11. Изменение влажности и содержания некоторых рудных

на глубине 1,5 м от дневной поверхности. На профилях ПП, пройденных с применением бурового раствора, исследованы изменения влажности (особенно на площадке 2) за счет искусственного увлажнения. Оказалось, что по абсолютным значениям влажность лессов после пропитки возросла на 2—3%, заметно изменилась она и в вертикальном разрезе. Если по профилю ТТ (исходный блок) граница 10%-ной влажности на глубине 1,5 м, то после увлажнения (профили ПП) она поднялась до 1—0,75 м. С глубиной влажность пород увеличивается.

В районе месторождения Дальнее до начала наших работ группой сотрудников под руководством С. П. Албула проводились весьма детальные площадные исследования лессовых отложений. Изучались мощность насосов методом ВЭЗ (вертикального электрического зондирования) и особенности их химизма (опробование по вертикали через 0,5 м при помощи шнекового бурения). В полевых условиях изучались состав, цвет, влажность, макропористость, структура, строение, мощность, распространенность литологических разностей и условия залегания. Приведем краткие сведения о выявленных ими геохимических особенностях распределения Si как одного из ведущих рудных элементов района в рыхлых четвертичных отложениях центральной части месторождения Дальнего, где располагался экспериментальный блок.

Для Si характерна максимальная концентрация в лессовидных, тяжелых суглинках и глинах. В нескольких точках количество Si достигает 0,02% (мода — 0,0009%, среднее арифметическое — 0,009; квадратичное отклонение — 0,001%). Содержание водорастворимых солей (в сорбционно-солевой составляющей) изменяется от 0,01 до 0,5 г/л. Четкой зависимости в распространении водорастворимых солей от рельефа, литологии и мощности пород нет. Количество меди в водорастворимой фазе (мкг/л) — вытяжки из 50 г породы и мкг/г водорастворимой соли на 1 г породы характеризуется следующими параметрами — мкг/г: мода = 800;  $\bar{X}$  = 840;  $\sigma$  = 20; максимально-аномальное содержание ( $\bar{X} + 3\sigma$ ) = 900 мкг/л; в карбонатной фазе — мода = 200;  $\bar{X}$  = 160;  $\sigma$  = 2; ( $\bar{X} + 3\sigma$ ) = 166.



элементов в лессах с глубиной.

таваясь на уровне 0,0002%. Зона максимальных содержаний Мо совпадает с границей 10%-ной влажности. Видимо, здесь испарялась свободная вода, менялся режим движения естественной влаги и осаждался Мо

В распределении меди нет такой четко выраженной тенденции. В вертикальном разрезе Си характеризуется пятнистым распределением, ее количество может меняться от 0,002 до 0,005—0,006% (см. рис. 12).

Подобная картина наблюдается и для Zn, содержание которого колеблется от 0,005 до 0,008%.

В карбонатных минералах содержание меди характеризуется параметрами (мкг/г): мода=20;  $\bar{X}=13$ ;  $\sigma=2,3$ ;  $(\bar{X}+3\sigma)=20$ .

Пробы анализировались (количественный спектральный анализ сделан А. А. Алабиной, ИГГ СО АН СССР) на Mo, Cu, Zn, Pb, Co, Ni. Основное внимание было уделено Си и Мо как элементам, наиболее характерным для субвулканических гидротермальных месторождений медно-молибденовой формации, в том числе и для подобных месторождений Алмалыкского рудного района, где проводился эксперимент. Рассмотрим распределение этих элементов.

Содержание молибдена (рис. 12) изменяется от 0,0001 до 0,0003%. При этом до глубины 1—1,5 м наблюдается минимальное содержание Мо (0,0001%). На глубине 1,5 м находится максимум (до 0,0003%), и ниже содержание Мо почти не изменяется, оставаясь на уровне 0,0002%.

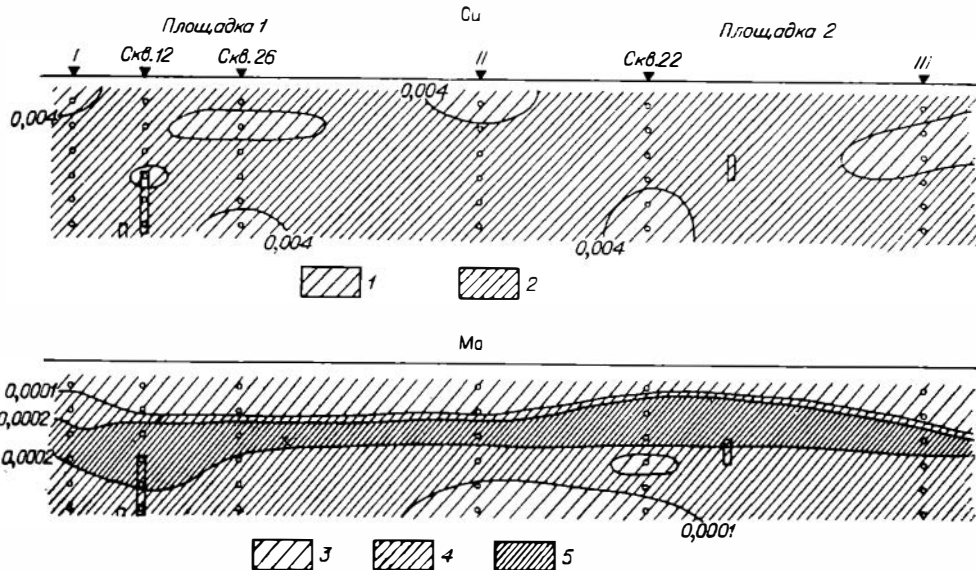


Рис. 12. Опробование площадок блока лессовидных пород до нагревания.

1 — от  $1,8 \cdot 10^{-3}$  до  $4 \cdot 10^{-3}$ ; 2 — от  $4 \cdot 10^{-3}$  до  $5,5 \cdot 10^{-3}$ ; 3 —  $< 0,1 \cdot 10^{-4}$ ; 4 — от  $1 \cdot 10^{-4}$  до  $2 \cdot 10^{-4}$ ; 5 — от  $2 \cdot 10^{-4}$  до  $3 \cdot 10^{-4}$ .

## Влажность лессов экспериментального блока

№ скважины	Глубина опробования, м	Влажность, %	№ скважины	Глубина опробования, м	Влажность, %	
<b>Площадка 1</b>			М	0,5	7,2	
12	0,5	6,5		1,0	10,4	
	1,0	7,4		1,5	10,2	
	1,5	8,8		2,0	18,6	
	2,0	10,8		2,5	17,4	
	2,5	12,7		3,0	14,0	
	3,0	13,4		Н	0,5	7,1
	3,5	12,8			1,0	6,9
	4,0	12,0			1,5	15,5
4,5	11,1	2,0			13,0	
26	5,0	15,7	<b>Площадка 2</b>			
	0,5	6,1	22	0,5	6,3	
	1,0	6,8		1,0	7,3	
	1,5	10,5		1,5	7,9	
	2,0	11,0		2,0	8,6	
	2,5	11,9		2,5	12,7	
	3,0	12,1		3,0	14,0	
	3,5	11,9		3,5	15,1	
	4,0	12,8		4,0	10,9	
	4,5	13,2		4,5	12,7	
5,0	10,8	5,0		11,2		
3	0,5	6,2	А	0,5	6,9	
	1,0	7,8		1,0	7,3	
	1,5	12,6		1,5	9,8	
	2,0	13,9		2,0	15,5	
	2,5	15,5		2,5	11,0	
	3,0	14,5		3,0	11,4	
Р	0,5	10,1	Б	0,5	16,0	
	1,0	9,5		1,0	6,8	
	1,5	11,5		1,5	9,0	
	2,0	8,0		2,0	11,1	
	2,5			2,5	14,2	
1	3,0		3,0	14,8		
	0,5	6,2	0	0,5	7,2	
	1,0	11,2		1,0	8,2	
	1,5	14,0		1,5	16,2	
	2,0	15,2	К	0,5	12,2	
2,5	14,6	1,0		9,0		
3,0	16,1	1,5		7,5		

Размещение измерительных и нагревательных скважин для площадок 1 и 2 идентично (см. рис. 10). Нагревательные скважины находились в центре площадок (скважины 6 и 5 для площадки 1 и скв. 6 для площадки 2). От нагревательных скважин по двум взаимно перпендикулярным направлениям располагались температурные измерительные профили (скважины 1—19). Два коротких профиля (скважины 20—23 и 24—27) служили для измерения тепловых потоков. Все скважины обсаживались в верхней части короткими (до 40 см) трубами и цементировались.

Датчики. В ходе экспериментальных работ проводилась периодическая запись следующих физических параметров: температуры, тепловых потоков и интенсивности газовыделения; фиксировалась мощность нагревателей (сила и напряжение электрического тока, питающего нагреватель).

Для длительного измерения температурного режима в нагреваемом блоке применялись хромель-алюмелевые (ХА) и хромель-копелевые (ХК) термодпары (диаметр проволоки 0,5 мм). Термодпары находились постоянно в скважинах 1—19 на глубине до 4—8 м. Термодпары подклю-

чались либо к пирометрическому гальванометру через многопозиционный переключатель, либо к электронному многоточечному потенциометру. Интервал измерения температур по глубине равен 1 м. ХА и ХК термодпары градуировались, и для измерений использовались с ТЭДС, близкой к стандартным (для ХА ТЭДС=0,041 мВ/°С, а для ХК — термодпар — 0,061 мВ/°С).

В отдельные скважины, предназначенные для других целей, вводились одиночные термодпары на различные глубины. Все это позволяло фиксировать температуры в различных частях экспериментального объема. Перед каждым измерением замерялась температура холодных спаев, находящихся в сосудах Дюара. Рабочая часть термодпар помещалась в высокоглиноземистые трубки диаметром 3 мм.

Тепловые потоки и их распределение в объеме экспериментального блока фиксировались при помощи медных калориметров цилиндрической формы (табл. 9). Величины тепловых потоков измерялись периодически.

Газовыделение из скважин глубиной 3 м и одинакового диаметра в различных частях блока фиксировалось в ходе опыта газовым счетчиком ГСБ-400 или стеклянными U-образными манометрами периодически (3—4 раза в день).

Нагреватели. В эксперименте 1970 г. применялись нагреватели, изготовленные из корундовых стержней с силой тока от 51 до 60 А и напряжением до 70 В. Это позволяло на каждом стержне получить температуру до 1400°C. Было изготовлено три нагревателя, каждый из трех стержней. Все они подключались параллельно к масляному автотрансформатору с предельным напряжением не более 55 В. Это ограничило интенсивность возможного нагревания в пределах 700°C. Мощность нагревателей измерялась методом амперметр-вольтметра. Максимальные рабочие параметры трех нагревателей следующие: сила тока — 200 А; напряжение 45 В; мощность — 9 кВт. На один нагреватель приходилась, таким образом, мощность в 3 кВт.

15/X 1970 г. в 18 ч 30 мин начался нагрев площадки 1. Периодически через 1—3 часа записывались все параметры в дневник (прилож. I).

Параметры датчиков теплового потока на поверхности 8,2 см<sup>2</sup>

Вес датчика, г	Постоянные калориметров	
	кал/С	кал/С·см <sup>2</sup>
41,4400	4,144	0,505
41,0580	4,106	0,500
41,8438	4,184	0,510
42,3620	4,236	0,516
41,5184	4,152	0,506
41,5686	4,157	0,506
41,9034	4,190	0,511
41,7494	4,175	0,509
41,7396	4,174	0,509
41,9704	4,197	0,511

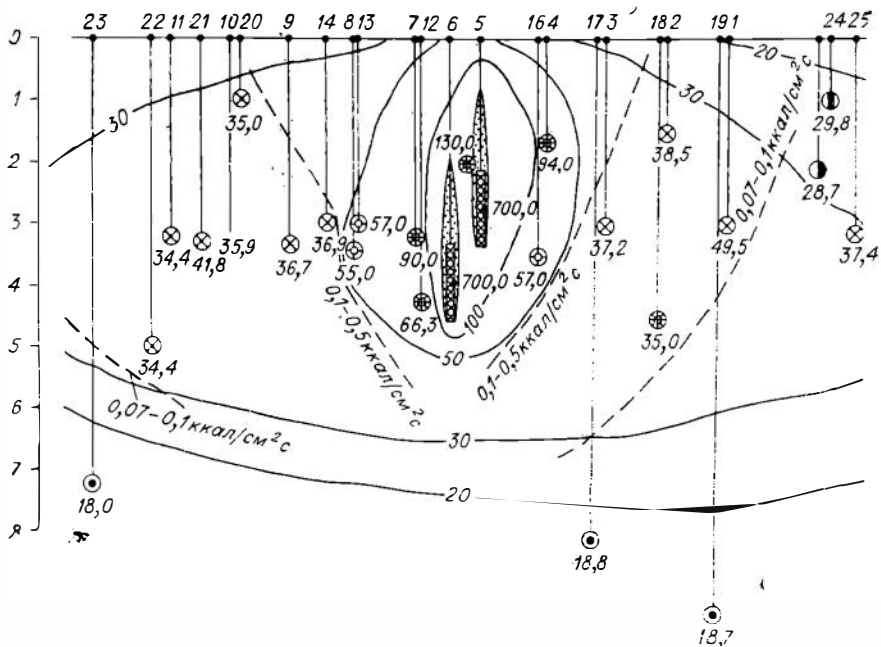
### ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО БЛОКА ПЕРЕД ОКОНЧАНИЕМ ОПЫТА

За время нагревания площадок 1 и 2 в объеме экспериментального блока было достигнуто относительно равновесное теплофизическое состояние. Рассмотрим теплофизические характеристики среды.

Таблица 10

Равновесные температуры (Т, °С) и тепловые потоки (q, кал/см<sup>2</sup>·с)

№ скважины	T	q	№ скважины	T	q	№ скважины	T	q	№ скважины	T	q
<b>Площадка 2</b>											
2	27,1	0,041	11	27,0	0,040	20	15,4	0,024	24	11,1	0,019
3	22,2	0,026	12	137,7	0,096	21	26,5	0,025	29	29,0	0,045
4	27,2	0,0341	13	36,5	0,066	22	27,8	0,025	30	28,2	0,028
5	33,0	0,072	15	33,0	0,072	23	25,6	0,019	31	18,4	0,007
7	162,5	0,277	16	18,3	0,026	25	19,0	0,010	32	37,0	0,007
8	25,2	0,025	17	25,0	0,020	26	21,5	0,010			
9	29,8	0,036	18	24,8	0,034	27	20,9	0,019			
10	27,0	0,040	19	30,1	0,041	27a	18,6	0,005			
<b>Площадка 1</b>											
1	49,5	0,078	10	31,9	0,072	18	27,0	0,057	25	37,4	0,086
2	38,5	0,078	11	30,6	0,061	19	18,7	0,007	26	34,9	0,066
3	37,2	0,086	12	66,3	0,277	20	35,0	0,110	27	27,0	0,057
4	70,5	0,215	13	50,2	0,172	21	34,3	0,072	P	23,0	0,573
7	90,0	0,215	14	36,9	0,078	22	34,4	0,086			
8	55,0	0,172	16	57,0	0,172	23	18,0	0,006			
9	34,0	0,078	17	18,8	0,007	24	29,8	0,051			



**Распределение температур**

В объеме экспериментального блока температуры измерялись более чем в 60 точках на разных глубинах. Это позволило составить общее представление о распределении теплового поля в блоке (табл. 10, рис. 13).

Максимальные температуры на поверхности корундовых нагревателей достигли 700°C. Наибольшая мощность зоны нагрева до 100°C на площадке 1 равна 2 м, а на площадке 2—1 м. Мощности зон 50-градусного нагрева соответственно равны 3,5—4 м и 1,5 м; зона 30-градусного нагрева пород на площадке 1 распространяется на глубину до 7 м и имеет мощность 10—13 м. На площадке 2 глубина опускания изотермы 30°C равна 3 м, а ширина зоны 30-градусного прогрета достигает 4 м.

Средняя температура блока до нагревания на глубине 10 м равнялась 18,5°C. Влияние нагревания прослежено до глубины 9 м. Это оценивается по изотерме 20°C.

### **Тепловой поток**

Тепловой поток в экспериментальном блоке изменялся от 0,001 до 0,5 кал/см<sup>2</sup>·с (см. рис. 13). При этом в зоне нагрева до 50°C преобладал тепловой поток от 0,1 до 0,5 для площадки 1 и от 0,07 до 0,5 кал/см<sup>2</sup>·с для площадки 2. В пределах изотермы 30°C для площадки 1 преобладал поток величиной 0,07—0,1 кал/см<sup>2</sup>·с, а для площадки 2—0,05—0,07 и до 0,03 кал/см<sup>2</sup>·с. Таким образом, тепловой поток на площадке 1 в одних и тех же зонах нагрева больше, чем на площадке 2.

Представляет интерес характер изменения величин температур и тепловых потоков в динамике нагревания для двух площадок (рис.

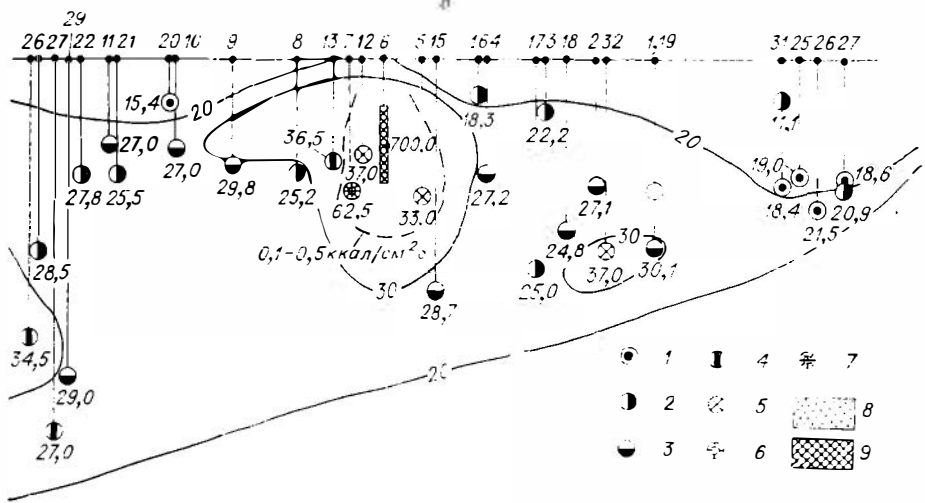


Рис. 13. Распределение температур и тепловых потоков в блоке лессовидных пород на вертикальной плоскости.

$a$  — площадка 1;  $b$  — площадка 2. Тепловые потоки ( $q$ , кал/см<sup>2</sup>·с): 1 — меньше 0,01, 2 — 0,01—0,03, 3 — 0,03—0,05, 4 — 0,05—0,07, 5 — 0,07—0,10, 6 — 0,10—0,20, 7 — больше 0,20; 8 — зона интенсивного нагревания (оплавления); 9 — нагреватели. Цифры под кружками — температуры ( $T$ ).

14). Весьма интересно, что нарастания тепловых потоков в объеме площадок 1 и 2 с ростом температуры не отличаются существенно друг от друга. Все точки лежат на одной кривой. При этом выявляется своеобразное изменение величин  $q$  в зависимости от  $T$ . Прямой пропорциональности между этими величинами не наблюдается. График зависимости величины  $q$  от  $T$  имеет предельную форму. Вначале наблюдается значительный рост тепловых потоков. Величина  $q$ , возрастает от 0,0 до 0,5 кал/см<sup>2</sup>·с (почти на два порядка) при нагревании от 15—18° до 70°С. Начиная с температуры 70°С график теплового потока идет почти параллельно оси температур. В точке 70°С происходит своеобразное «насыщение» теплового потока, после чего увеличение температуры слабо сказывается на тепловом потоке.

По-видимому, величина «насыщенного» теплового потока и температура подобного «насыщения» связаны с теплофизическими и гидродинамическими свойствами среды и мощностью нагревателя. Следует обратить внимание на эту особенность, так как она может оказаться суммированным выражением теплофизического режима процесса.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Рассмотрим особенности вещественного изменения пород, составляющих экспериментальный блок после нагревания. При обработке материалов использованы данные количественного спектрального анализа (более 400 обр.).

В качестве индикаторных элементов (ИЭ) взяты Ni, Co, Cu, Zn, Pb, Mo, для которых выполнены количественные определения.

Конечный анализ фактических материалов проводился в три этапа: 1) феноменологическое описание особенностей перераспределения элементов; 2) статистическое описание результатов работ; 3) корреляционный анализ. Эта этапность обработки материалов является следствием того, что переход от одного уровня обработки к другому требует

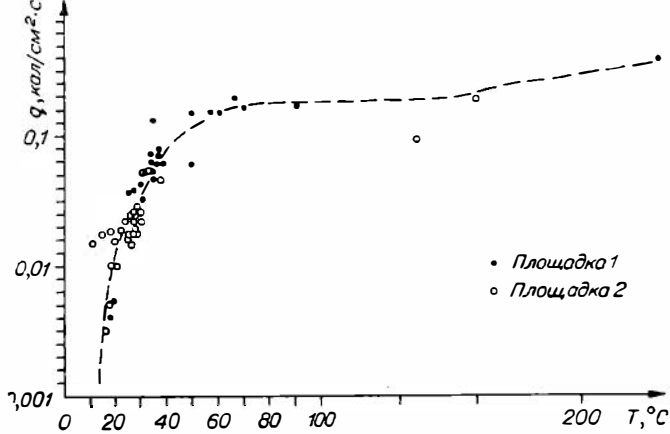


Рис. 14. Зависимость между тепловыми потоками ( $q$ ) и температурой нагревания ( $T$ ) в блоке лессовидных пород.

решения все более сложных аналитических и расчетных задач. Так, если первый уровень анализа выполним сразу же после получения результатов опробования, то переход на статистический уровень требует обработки полученных данных на ЭВМ и т. д.

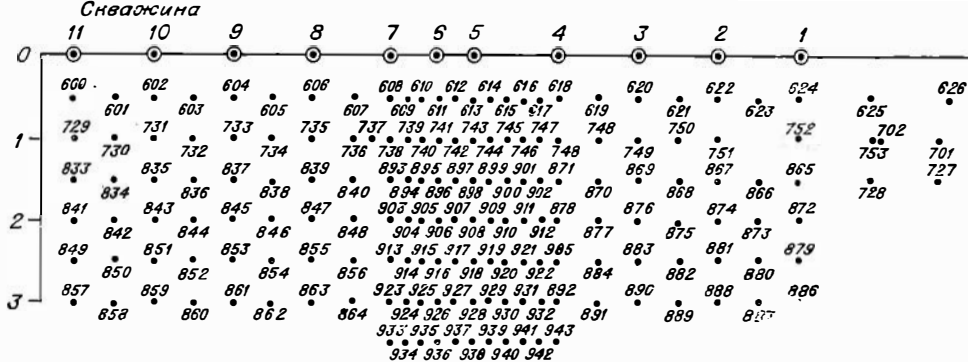
После окончания полевых работ экспериментальный блок был разобран при помощи экскаватора и опробован. Схемы опробования приведены на рис. 15 (площадка 1) и на рис. 16 (площадка 2). Детальному исследованию подверглись пробы ( $>400$  шт.) из вертикальной плоскости, проходящей через середину экспериментального блока и включающей все нагреватели. Для этой плоскости построены планы распределений элементов, теплофизических параметров и т. д.

Рассмотрим поведение отдельных элементов (рис. 17).

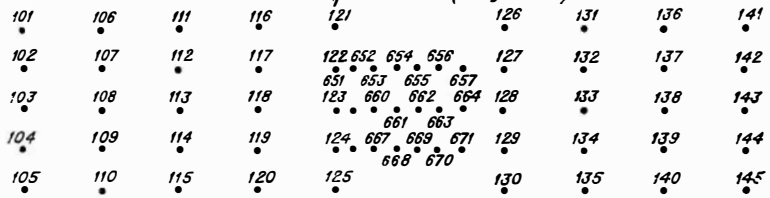
**Никель.** Содержание Ni в исходных породах (перед нагреванием) изменялось от 0,0017 до 0,0025 %. После нагревания количество элемента (см. рис. 17) колебалось в пределах 0,0007—0,0095 (площадка 1) и 0,0034—0,0087 % (площадка 2). В экспериментальном блоке до начала нагревания наблюдалось довольно спокойное распределение никеля с глубиной. После нагревания это плавное распределение никеля разрушается. На площадке 1 в зоне интенсивного нагревания повышено содержание никеля (особенно в верхней части нагревателя) на величину до 0,010%. Верхняя часть разреза площадок 1 и 2 обогащается никелем по всему разрезу через блок. В пределах площадки 2 на уровне верхнего конца нагревателя наблюдается резкий скачок увеличения содержания Ni от 0,005 до 0,0087%.

Анализ распределения Ni по абсолютным содержаниям (см. рис. 17) свидетельствует о том, что его количества могут изменяться от 0,0007 до 0,0090% (площадка 1) и от 0,023 до 0,0100% (площадка 2). При построении изоконцентрат на плане выделены следующие характерные интервалы содержания Ni: а) минимальные  $<0,0040\%$ ; б) промежуточные (средние) — 0,0040—0,0060% и в) повышенные — 0,0060%.

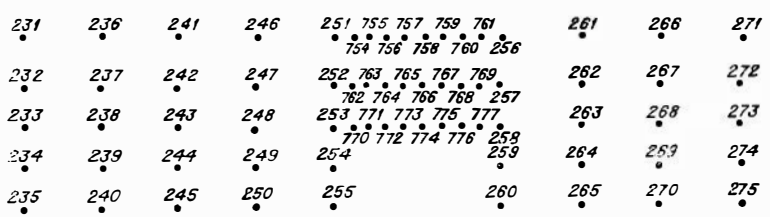
В распределении Ni в объеме экспериментального блока наблюдалась тесная корреляция с очагами нагрева. Конфигурация изоконцентрат Ni для площадки 1 — типичной чашеобразной структуры, внутренняя часть которой характеризуется пониженными содержаниями элемента (вынос). Участки с повышенными содержаниями Ni тяготеют к верхним частям очагов нагрева и к поверхностному слою (до глубины 0,75 м) площадок.



**Горизонт 1 (глуб. 1 м)**



**Горизонт 2 (глуб. 2 м)**



**Горизонт 3 (глуб. 4 м)**

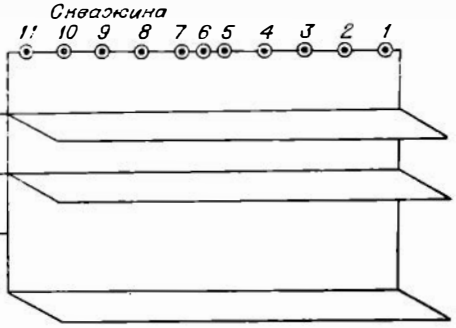
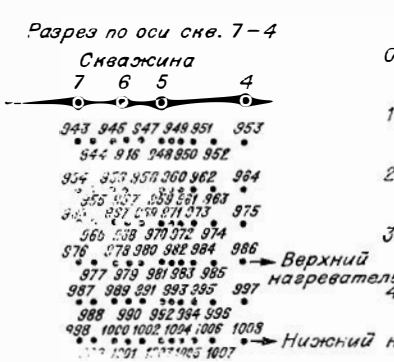
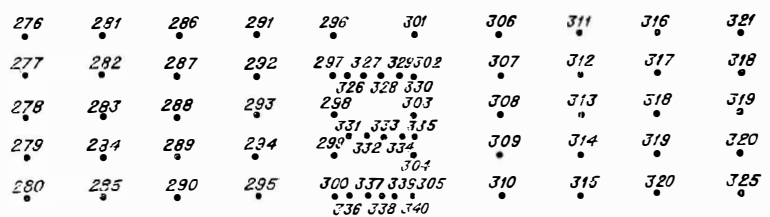


Рис. 15. Схема опробования площадки I в блоке лессовидных пород.



Скважина										
11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
627	628	629 630 631	632	633	634 636 638 640 642	644	645	646	648 649 650 672	
700	699 698 697	696 695	694	693 691	689 687 685 683 682	681	680 679	678	677 673	
726	725 724 723	722 721	720	719 717 715	713 711 709	708 707	706 705	704	703 674	
801	800 799 798 797	796	795	794 792 790	788 786 784	783 782	781 780	779	778 675	
825	824 823 822 821	820	819	818 816 814 812 810	808	807	806	805	804 676	

Горизонт 1 (глуб. 1 м)

151	156	161	166	171	176	181
152	157	162	167	172	177	182
153	158	163	168	173	178	183
154	159	164	169	174	179	184
155	160	165	170	175	180	185

Горизонт 2 (глуб. 3 м)

186	191	196	201	206	211	216	221	226
187	192	197	202	207	212	217	222	227
188	193	198	203	208	213	218	223	228
189	194	199	204	209	214	219	224	229
190	195	200	205	210	215	220	225	230

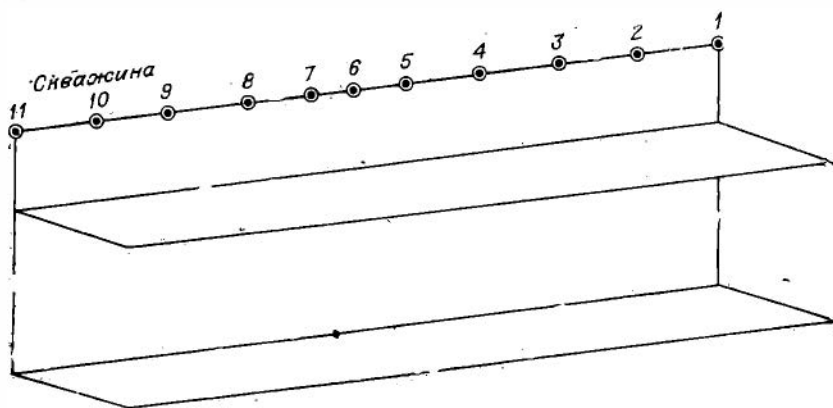


Рис. 16. Схема опробования площадки 2 в блоке лессовидных пород.

На площадке 1 сформировались две зоны концентрации металла: верхняя (приповерхностная) и средняя, выполняющая нижнюю часть «чаши» и верхнюю часть области нагрева. Отчетливо прослеживаются структуры потока.

Для площадки 2 характерны несколько повышенное содержание и более однообразное распределение Ni в разрезе. Однако и здесь проявляются процессы отгонки металла вверх. На площадке 2 формируется мощная зона повышенных содержаний, распространяющаяся до глубины 2,5 м. Над нагревателем же ее нижняя граница поднимается до уровня 1,5 м и приобретает прихотливую извилистую форму. Сама

область интенсивного нагрева характеризуется промежуточными содержаниями Ni, а ниже очага располагается зона минимальных содержаний элемента.

**Медь.** В исходных породах содержание Cu изменялось в пределах 0,004—0,006%, с глубиной неравномерно (см. рис. 12).

После нагревания (см. рис. 17) в распределении Cu наблюдаются характерные изменения как с глубиной, так и в плане. На площадке 1 в зоне интенсивного нагрева ощущается отчетливый вынос Cu в верхнюю часть разреза (содержание возрастает в этом направлении от 0,0020 до 0,0080%). Эта тенденция проявляется и вне зоны интенсивного нагрева. Здесь количество Cu возрастает с 0,0045 до 0,0070%. Особенно хорошо это прослеживается на площадке 2.

В зоне нагрева скачок увеличения количества Cu равен 0,0080% (от 0,0050 до 0,0090%); вне зоны интенсивного нагрева наблюдается постепенное возрастание содержания металла с 0,0050 на глубине 2,5 м до 0,0080—0,0090% — на глубине 0,5 м. Максимум содержания Cu в зоне нагрева отстоит от верхней кромки нагревателя на расстоянии 1—1,5 м.

По абсолютным количествам Cu, ее содержание в породах экспериментального блока (см. рис. 17) изменяется от 0,0010 до 0,0100% (площадка 1) и от 0,0020 до 0,0200% (площадка 2). Карта изолиний концентрации Cu построена по следующим группам содержаний: а)  $<0,0040\%$  б)  $0,0040—0,0060\%$  и в)  $>0,0060\%$ .

Перераспределение Cu в разрезе четко контролируется очагами нагрева: из зоны нагревания она выносится. Область пониженных содержаний Cu на площадке 1 захватывает преимущественно зону нагрева. Часть элемента отгоняется к поверхности блока, где образуется выдержанный горизонт с высокими содержаниями, другая же часть выносится в менее прогретые боковые зоны блока.

Менее отчетливо это проявляется на площадке 2 (она более насыщена Cu; нагрев был менее интенсивный). Но и здесь область нагрева характеризуется более пониженными содержаниями Cu, а аномально высокие ее количества наблюдаются вверху и в стороне от нагревателя. Структура изоконцентрат Cu подчеркивает структуру теплового поля.

**Цинк.** В исходных породах заметных изменений содержаний Zn в разрезе и в плане не наблюдалось. Содержание элемента после нагревания обнаруживает тенденцию к снижению с глубиной от 0,005 до 0,003% (см. рис. 17). На площадке 2 наблюдается резкий минимум над верхней кромкой нагревателя ( $\Delta C_{zn} = -0,0015\%$ ).

Содержание цинка в породах на обеих площадках после нагревания изменяется от 0,0025 до 0,0070%. На плане изоконцентрат (см. рис. 17) нанесены следующие группы содержаний: а)  $<0,0040$ ; б)  $0,0040—0,0055$  и в)  $>0,0055\%$ .

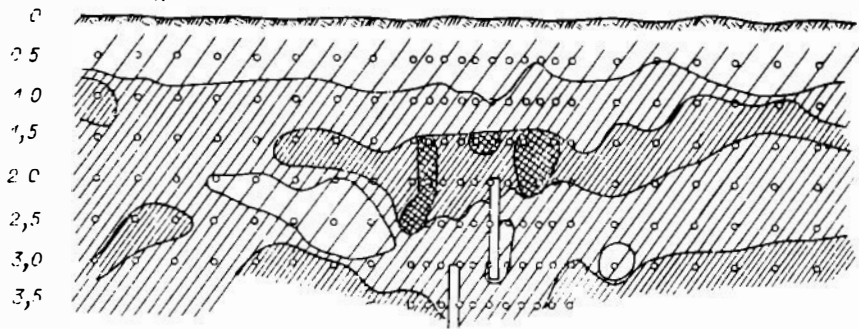
Верхняя часть площадки 1 характеризуется промежуточными содержаниями элемента, нижняя — пониженными. В верхней находятся и отдельные пятна повышенных содержаний. На площадке 1 прослеживается довольно четкая чашеобразная форма распределения цинка. «Чаша» выполнена породами со средними содержаниями элемента (с пятнами аномально высоких содержаний). Низ «чаши» обеднен Zn. Над нагревателями формируется столбообразная зона, где содержание металла снижено.

На площадке 2 наблюдается подобная картина в распределении цинка с образованием чашеобразной структуры.

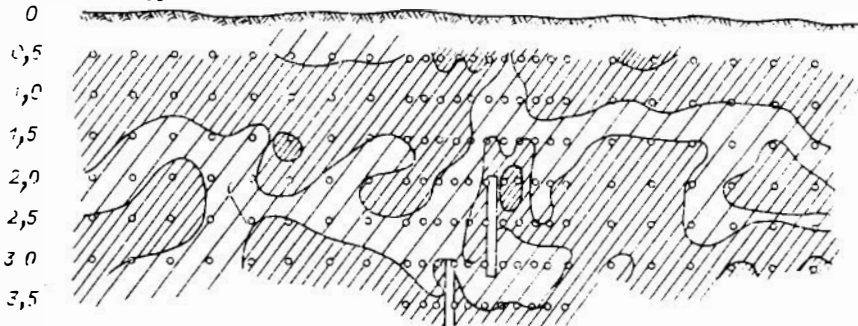
**Свинец.** В исходных породах количество Pb изменялось в пределах от  $<0,0010$  до 0,0030%.

После нагревания (см. рис. 17) резких изменений содержания Pb в плане и в разрезе не наблюдается. Можно отметить лишь слабое уве-

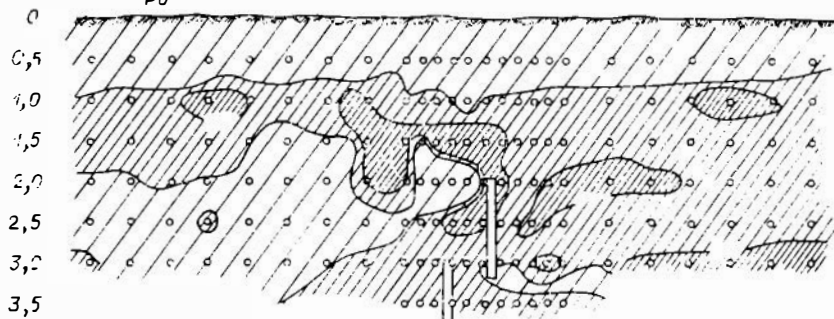
Mn



Co



Pb



Zn



Mo

Co

Pb

Zn


 $0,5 \cdot 10^{-5}$  до  $1 \cdot 10^{-4}$ 
 $0,5 \cdot 10^{-6}$  до  $1 \cdot 10^{-3}$ 
 $0,5 \cdot 10^{-4}$  до  $1 \cdot 10^{-3}$ 
 $0,2 \cdot 10^{-2}$  до  $4 \cdot 10^{-3}$ 

 $0,1 \cdot 10^{-4}$  до  $2 \cdot 10^{-4}$ 
 $0,1 \cdot 10^{-3}$  до  $2 \cdot 10^{-3}$ 
 $0,1 \cdot 10^{-3}$  до  $1,5 \cdot 10^{-3}$ 
 $0,4 \cdot 10^{-2}$  до  $5,5 \cdot 10^{-3}$ 

 $0,2 \cdot 10^{-4}$  до  $4 \cdot 10^{-4}$ 
 $0,2 \cdot 10^{-3}$  до  $3,5 \cdot 10^{-3}$ 
 $0,1,5 \cdot 10^{-3}$  до  $4,5 \cdot 10^{-3}$ 
 $0,5,5 \cdot 10^{-3}$  до  $1 \cdot 10^{-2}$ 

 $0,4 \cdot 10^{-4}$  до  $8,5 \cdot 10^{-4}$

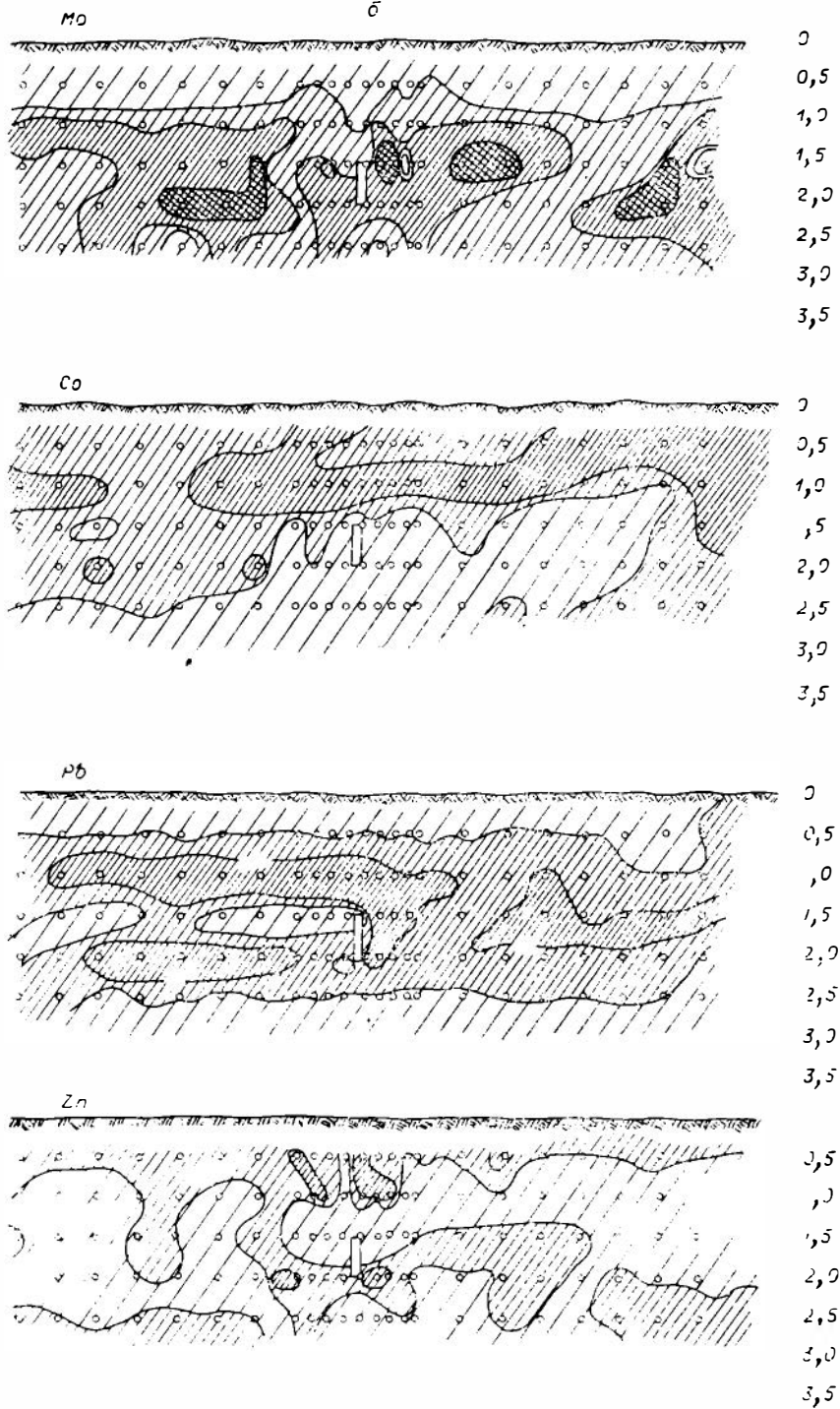
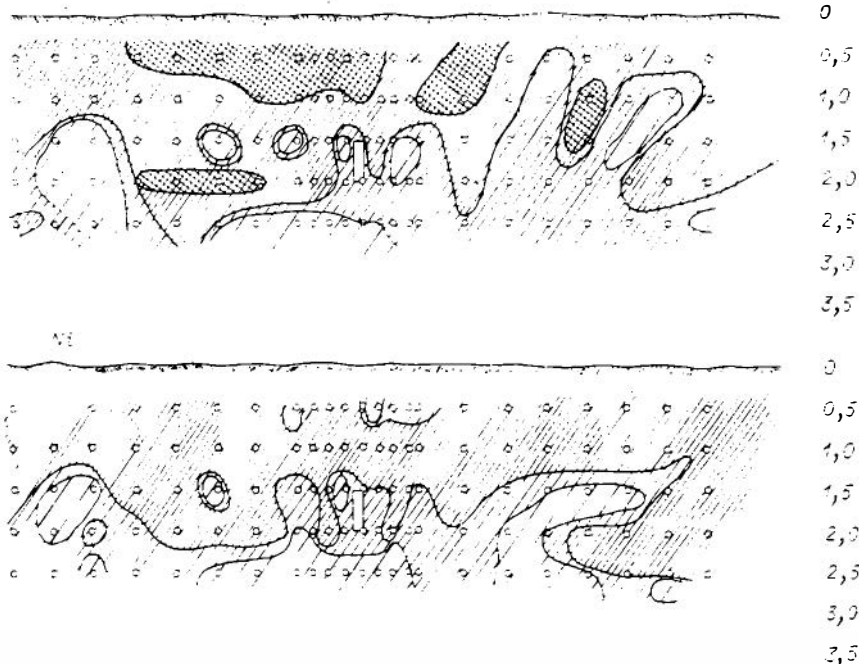


Рис. 17. Распределение рудных элементов в зонах нагревания лессов.  
 а — площадка 1. б — площадка 2.





Окончание рис. 17

ний  $Co$  на разных уровнях для площадки 1 не наблюдается. На площадке 2 фиксируется скачок увеличения содержания над нагревателем с 0,0008 до 0,0030%.

Для построения карты распределений  $Co$  выделены следующие группы концентраций: а)  $< 0,001$ ; б)  $0,001—0,002\%$ ; в)  $> 0,002\%$  (и до 0,0035). Содержание  $Co$  в пробах колеблется от 0,0001 до 0,0035% (см. рис. 17).

На площадке 1 преобладают средние содержания. При этом зона пониженных содержаний металла приурочена к средней части разреза и образует сложную извилистую полосу мощностью 0,5—1,0 м, расположенную на глубине 1,00—1,25 м (верхняя кромка), со сложными ответвлениями, раздувами, петлями, окнами и т. п. В зоне интенсивного прогрева площадки 1 фиксируется слабое воздействие температурного поля на распределение  $Co$ . Так, непосредственно над очагом нагревания область минимальных содержаний поднимается до глубины 0,5 м и приобретает форму «столба». Участки с повышенными содержаниями небольших размеров и встречаются на всех уровнях, не обнаруживая видимой зависимости от очага нагрева.

На площадке 2 наблюдается отчетливая связь полей концентрации элемента и температур. Верхняя часть площадки более обогащена  $Co$ , как и на площадке 1. Однако нижняя часть разреза на площадке 2 сложена породами с минимальными количествами  $Co$ . Над нагревателем образуется пластообразная зона с повышенными содержаниями металла.  $Co$  выносятся из зоны нагрева вверх, и породы, прилегающие к нагревателю, обеднены.

**Молибден.** Распределение  $Mo$  в пределах площадки 1 после прогрева значительно усложняется. Если в исходных породах (см. рис. 12) ниже уровня 1,5—2 м содержание  $Mo$  в преобладающем большинстве проб составляло  $2 \cdot 10^{-4}\%$ , относительно редко повышаясь до  $3 \cdot 10^{-4}\%$  или снижаясь до  $1 \cdot 10^{-4}\%$ , то в зоне прогрева в отдельных пробах количество  $Mo$  повышается уже до  $6—9 \cdot 10^{-4}\%$ , а в близповерх-

ностной зоне и в отдельных участках на глубине сокращается до  $5 \cdot 10^{-5}\%$  (см. рис. 17).

Наряду с увеличением дисперсии содержаний Мо в зоне прогрева происходит формирование участков обогащения Мо. Последние тяготеют преимущественно к верхней части очага нагрева, образуя над ним своеобразную «шапку». При этом наибольшая концентрация Мо фиксируется в непосредственной близости от очага нагрева в виде небольших участков, разобщенных зонами с относительно пониженными ( $2-3 \cdot 10^{-4}\%$ ) содержаниями Мо. Они прослеживаются в субгоризонтальном направлении и за пределами очага нагрева, особенно далеко распространяясь в сторону площадки 2. Возможно, что асимметричный характер этой зоны во многом обусловлен влиянием искусственного увлажнения.

По своему положению в вертикальном разрезе область концентрации Мо над очагом нагрева отчасти совпадает с зоной максимальных ( $3 \cdot 10^{-4}\%$ ) содержаний его в исходных породах, но заметно отличается от последней по своей морфологии (явное тяготение к очагу нагрева) и по присутствию в ней участков повышенных содержаний, вообще нехарактерных для исходных пород.

Область повышенных концентраций Мо сверху и снизу оконтуривается зонами пониженных содержаний. При этом если количество Мо в верхней зоне близко или даже несколько превышает его в исходных породах (минимальные содержания Мо зафиксированы в узкой приповерхностной ленте породы), то в нижней зоне оно постоянно остается ниже исходных концентраций. В последней зоне отмечены и отдельные участки с наиболее низкими (для разреза) содержаниями Мо, тяготеющие здесь к нагревателям. Нижняя зона пониженных концентраций являлась, очевидно, основной зоной выноса Мо, локализующегося над очагом нагрева. Судя по относительно низким содержаниям Мо в верхней зоне и пониженным концентрациям непосредственно выше очага нагрева, из них также извлекался Мо (хотя и в меньшем количестве).

Наконец, в нижней части разреза содержание Мо аналогично исходному. Эта зона в разрезе имеет форму чаши с углублением в области нагревателей.

В пределах площадки 2 три изолированных участка с относительно повышенными концентрациями Мо, располагающиеся приблизительно на одном и том же глубинном уровне. Выше и ниже уровня содержание Мо более низкое. Заметно снижено содержание Мо по оси нагревателя с удалением от него на глубину и к поверхности. Образование изолированных участков с повышенной концентрацией обусловлено, очевидно, разрывом сплошности зоны в результате стягивания вещества к очагу нагрева.

### Статистический анализ материалов

Для всех индикаторных элементов считались на ЭВМ следующие статистики: средние, дисперсии, основные отклонения, изменчивость, асимметрия, эксцесс, статистические ошибки всех названных параметров, критерии Фишера и Стьюдента.

Частные выборки для площадок 1 и 2 брались по областям нагрева и по уровням глубины. Так, для площадки 1 выделено 7 уровней через 0,5 м и четыре зоны нагревания: 1)  $< 30^\circ\text{C}$ ; 2)  $30-50^\circ\text{C}$ ; 3)  $50-100^\circ\text{C}$ ; 4)  $> 100^\circ\text{C}$ .

Для площадки 2 взяты выборки по 5 уровням глубины (через 0,5 м) и по четырем зонам нагревания: 1)  $< 20^\circ\text{C}$  2)  $20-30^\circ\text{C}$ ; 3)  $30-50^\circ\text{C}$ ; 4)  $50-100^\circ\text{C}$ . Некоторые результаты счета приведены в прил. II.

В качестве статистических параметров взяты: 1 — среднее; 2 — дисперсия; 3 — основное отклонение; 4 — изменчивость; 5 — ко-  
 сость; 6 — крутость; 7 — ошибка среднего; 8 — ошибка изменчивости,  
 n — количество проб в выборке.

Анализ массовых материалов по зонам нагревания позволил разде-  
 лить все элементы на 3 группы активности. Под группой активности  
 здесь понимается степень изменения содержания элемента под воздей-  
 ствием нагревания.

Группы активности следующие: 1 — слабое изменение; 2 — сред-  
 нее изменение; 3 — сильное изменение средних содержаний.

На площадке 1 элементы по группам активности распределены сле-  
 дующим образом: 1-я — Zn; 2-я — Ni, Co, Mo, 3-я — Cu, Pb; на площад-  
 ке 2: 1-я — Zn; 2-я — Ni, Cu; 3-я — Pb, Co, Mo.

Таким образом, для большинства элементов характерно заметное  
 изменение среднего содержания в зависимости от интенсивности нагре-  
 вания (см. рис. 17, табл. 11).

В наименее прогретых участках экспериментального блока увели-  
 чено количество Zn, Ni, Cu, Co. Так, по средним статистическим содер-  
 жаниям для площадки 1 при усилении степени нагревания (области  
 нагрева 1—4) получены следующие значения, %: Zn — 0,0052—  
 0,0042—0,0046—0,0046 (ошибка среднего  $\pm 0,00025$ ); Ni — 0,0066—  
 0,0047—0,0053—0,0051 (ошибка среднего  $\pm 0,0003$ ); Cu — 0,0062—  
 0,0050—0,0050—0,0032 (ошибка среднего  $\pm 0,0005$ ); Co — 0,00141—  
 0,00128—0,00125—0,00113 (ошибка среднего  $\pm 0,00001$ ).

В наиболее прогретых частях блока концентрируются Mo, Pb.  
 Например, для площадки 1 характерны следующие содержания элемен-  
 тов по областям нагрева (от первой к четвертой, %): Mo — 0,00015—  
 0,00017—0,00018—0,00022 ( $\pm 0,00002$ ); Pb — 0,00111—0,00095—0,00102—  
 0,00132 ( $\pm 0,0001$ ).

Статистические характеристики распределения рудных элементов  
 по зонам нагрева на различных уровнях глубины и данные по динамике  
 перегруппировки вещества в этих же координатах показывают, что  
 в перераспределении отдельных элементов по уровням глубинности в за-  
 висимости от зон нагревания имеются свои особенности (прил. III,  
 табл. 12).

Повышенные количества Mo, например, фиксируются преимущест-  
 венно на глубинах 1,5—2 м, т. е. в районах непосредственного воздей-  
 ствия очага нагрева (около его верхней кромки). Максимальное со-  
 держание этого элемента (среднее до 3,9 г/т) на таких глубинах  
 устанавливается в пределах изотермы  $>100^\circ\text{C}$ . С переходом в более  
 «холодные» участки отмечается снижение его количества, и только  
 фактически уже за пределами области нагревания содержание снова  
 возрастает до 3,8 г/т.

Т а б л и ц а 11

**Преимущественная концентрация элементов по областям нагрева**

Область нагрева, С	Площадка 1	Площадка 2
<20	—	Zn, Ni, Cu, Co
20—30	Zn, Ni, Co, Cu	Pb, Mo
30—50	Zn, Co	Pb, Mo
50—100	Co	Pb, Mo
> 100	Mo, Pb	—



## Динамика перегруппировки рудных элементов в результате нагревания (средние содержания, г/т, площадка 1)

Зона нагрева, °С	Глубина, м						
	0,0—0,05	0,5—1,0	1,0—1,5	1,5—2,0	2,0—2,5	2,5—3,0	3,0—3,5
<b>Молибден</b>							
<30	0,9	1,7	3,8	—	—	—	—
30—50	0,8	2,2	2,4	1,3	1,6	2,3	—
50—100	0,8	1,3	2,5	2,4	1,7	1,8	1,9
>100	0,9	1,4	3,9	3,1	1,4	1,3	1,7
<b>Медь</b>							
<30	75,9	36,3	57,5	—	—	—	—
30—50	65,5	45,8	46,0	61,3	48,6	46,8	—
50—100	77,4	41,2	64,2	45,0	36,0	36,6	23,0
>100	90,0	44,0	28,7	28,4	22,7	24,8	31,3
<b>Свинец</b>							
<30	8,1	16,3	13,0	—	—	—	—
30—50	8,0	14,6	10,6	5,3	5,2	13,4	—
50—100	8,9	12,2	14,8	7,0	4,0	13,1	12,3
>100	9,0	11,5	15,1	12,9	14,5	12,6	13,3
<b>Никель</b>							
<30	61,4	57,8	95,0	—	—	—	—
30—50	53,1	52,1	40,4	41,6	40,4	55,8	—
50—100	76,3	42,3	45,4	61,0	35,8	50,0	46,7
>100	77,5	43,7	52,5	52,4	54,7	39,6	51,9
<b>Кобальт</b>							
<30	14,1	12,5	17,0	—	—	—	—
30—50	13,5	12,3	12,8	11,3	11,1	15,4	—
50—100	17,1	10,8	11,4	12,8	10,0	11,2	12,0
>100	13,5	11,0	11,0	12,2	11,1	9,8	12,3
<b>Цинк</b>							
<30	54,5	44,8	48,0	—	—	—	—
30—50	53,6	50,0	45,7	44,8	44,6	38,4	—
50—100	50,4	49,2	29,0	49,5	37,4	35,0	32,7
>100	36,0	45,3	45,4	48,9	42,8	39,4	35,6
<b>Сумма рудных элементов</b>							
<30	214,9	169,4	234,4	—	—	—	—
30—50	194,5	177,0	157,9	155,6	151,5	172,1	—
50—100	230,9	157,0	167,3	177,7	124,9	147,7	128,6
>100	226,9	156,9	156,6	157,9	147,2	127,5	146,1

Относительно первоначального распределения максимальный уровень (до 3 г/т), который раньше также тяготел к глубинам 1—1,5 м (к границе 10%-ной влажности), после нагревания отмечен в зоне интенсивного нагревания (в пределах участков, ограниченных изотермой  $>100^{\circ}\text{C}$ ).

На более глубоких горизонтах содержание Mo остается на уровне или даже ниже (особенно в районе нагревателей) среднего в исходном блоке. Заметно понижено количество Mo над нагревателями (глубина 1 м). Приповерхностная зона, как и в случае исходного блока, остается относительно обедненной Mo.

Отчетливая концентрация Si отмечена в приповерхностной зоне, где содержание элемента в среднем заметно выше содержания его в исходном блоке (в том числе и по данному глубинному уровню). С глубиной содержания Si обычно падает, что отчетливо прослеживается в зонах, ограниченных изотермами  $50\text{—}100^{\circ}\text{C}$  и  $>100^{\circ}\text{C}$ . Минимальные содержания элемента в пределах очага нагрева (изотерма  $>100^{\circ}\text{C}$ ), включая сюда и участки, на которых фиксируются аномально повышенные количества Mo.

Относительно повышено содержание Pb на глубоких горизонтах и в других зонах нагревания. Приповерхностная зона, как и в случае исходных пород, обеднена этим элементом. В целом наибольшая концентрация Pb характерна для участков, расположенных в пределах изотермы  $>100^{\circ}\text{C}$ .

Ni более тяготеет к приповерхностной зоне. Относительно повышены его количества за пределами зоны нагревания. Небольшое повышение содержания элемента установлено и в районе очага нагрева (в пределах изотермы  $>100^{\circ}\text{C}$  и прилегающих к ней участков).

Относительно четких закономерностей при анализе динамики перераспределения Co не устанавливается. Более или менее отчетливо можно, очевидно, говорить о несколько пониженных его количествах вблизи очага нагрева и повышенном содержании в приповерхностном слое.

Zn тяготеет к приповерхностному слою, за исключением участка, находящегося прямо над нагревателем (изотерма  $>100^{\circ}\text{C}$ ). Более высокие концентрации Zn устанавливаются и для зон, располагающихся по периферии области нагрева.

Учитывая, что отдельные участки экспериментального блока в зависимости от их положения относительно очага нагрева (например, области, примыкающие к очагу, над очагом и ниже очага) неравнозначны по своему гидродинамическому режиму, распределение элементов относительно изотермы целесообразнее рассматривать с учетом тепло- и массопотоков. Учесть последние до некоторой степени возможно при анализе перегруппировки вещества по уровням глубин (прил. III).

а. Уровень 1 (0,5 м) — приповерхностный слой — по сравнению с другими уровнями отличается резко повышенной концентрацией вещества. Максимальная концентрация в зоне изотермы  $50\text{—}100^{\circ}\text{C}$ . В пределах изотермы  $>100^{\circ}\text{C}$  концентрация несколько снижается, очевидно, за счет интенсивного выноса в этой зоне паро-газовой смеси за пределы экспериментального блока. По зонам нагрева (1—4) сумма рудных изменяется так: 1-я — 214,9; 2-я — 194,5; 3-я — 230,9; 4-я — 226,9 г/т.

б. Уровень 2 (1 м). Концентрации близки к средним концентрациям суммы элементов по блоку. Различия по зонам нагревания менее существенны. Несколько повышена концентрация вещества в периферийных зонах ( $<30^{\circ}\text{C}$  и особенно  $30\text{—}50^{\circ}\text{C}$ ). Зоны нагрева содержат: 1-я — 169,4; 2-я — 177,0; 3-я — 157,0 и 4-я 156,9 г/т рудных.

в. Уровень 3 (1,5 м). На этой глубине, когда уже интенсивнее начинает сказываться воздействие очага нагрева и гидродинамиче-

ская система находится на достаточной глубине, резко возрастает сумма элементов по периферии области нагревания ( $<30^{\circ}\text{C}$ ). Несколько повышена концентрация вещества в зоне  $50\text{--}100^{\circ}\text{C}$ . Ряд содержаний рудных элементов по зонам нагрева: 1-я — 234,4; 2 — 157,9 3-я — 167,3; 4-я — 156,6 г/т.

г. Уровень 4 (2 м). По относительно повышенной концентрации вещества здесь также выделяется зона  $50\text{--}100^{\circ}\text{C}$ . Сумма рудных по зонам нагрева изменяется следующим образом: 2-я — 155,6; 3-я — 177,7; 4-я — 157,9 г/т.

д. Уровень 5 (2,5 м) — на глубине нагревателя. Наиболее высокая концентрация суммы элементов по периферии области нагревания (зона  $30\text{--}50^{\circ}\text{C}$ ). Второй максимум приходится на зону интенсивного нагревания ( $>100^{\circ}\text{C}$ ). Зона  $50\text{--}100^{\circ}\text{C}$ , которая выше обычно обогащена рудными элементами, на данном уровне характеризуется заметно пониженной концентрацией рудного вещества. Для этого уровня распределение суммы рудных по зонам нагревания имеет вид: 2-я — 151,5; 3-я — 124,9; 4-я — 147,2 г/т.

е. Уровень 6 (3 м). Концентрация суммы рудных элементов с удалением от очага нагревания возрастает и достигает максимума (среди опробованных зон) в периферийной зоне  $30\text{--}50^{\circ}\text{C}$ . Содержание рудных в зонах нагрева следующее: 2-я — 172,1 3-я — 147,7; 4-я — 127,5 г/т.

ж. Уровень 7 (3,5 м) характеризует нижнюю область очага нагревания. Из двух опробованных зон ( $50\text{--}100^{\circ}\text{C}$  и  $100^{\circ}\text{C}$ ) наибольшая концентрация суммы рудных элементов зафиксирована в максимально прогретой зоне ( $>100^{\circ}\text{C}$ ). Зоны нагрева содержат следующие количества рудных: 3-я — 128,6; 4-я — 146,1 г/т.

### Распределение элементов в зоне максимального нагревания

Зона максимального нагревания ( $200\text{--}700^{\circ}\text{C}$ ), непосредственно прилегающая к нагревателям, была опробована более детально с отбором проб через 5 см по линиям от нагревателей. Здесь отчетливо выделяется область относительно повышенных концентраций всех анализируемых элементов (табл. 13). Эта область в основном располагается около нагревателей и имеет мощность до 10 см. При этом отмечено, что если Cu, Zn, Ni, Co (?) максимально концентрируются в непосредственной близости от нагревателя, то Mo и Pb несколько «отходят» от него, не выходя, однако, за пределы общей зоны повышенных концентраций рудных элементов. Сумма рудных элементов в зоне 0—10 см от нагревателя равна 184,0—159,0 г/т, а на расстоянии от 10 до 30 см она составляет лишь 101,6—108,8 г/т.

Таблица 13

Распределение элементов в зоне максимального прогрева около нагревателя, %

№ образца	Расстояние от нагревателя, см	Mo	Pb	Cu	Zn	Ni	Co	Сумма рудных, г/т
1а	0—5	$2,2 \cdot 10^{-4}$	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$4,5 \cdot 10^{-3}$	$9 \cdot 10^{-4}$	184,0
1б	5—10	$3 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$3,5 \cdot 10^{-3}$	$4,2 \cdot 10^{-3}$	$9 \cdot 10^{-4}$	159,0
1в	10—15	$2,2 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$7 \cdot 10^{-4}$	106,2
1г	15—20	$1,8 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$3,8 \cdot 10^{-3}$	$7 \cdot 10^{-4}$	108,8
1д	20—25	$1,8 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$3,2 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-4}$	106,8
1е	25—30	$1,6 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-4}$	101,6

## НАГРЕВАНИЕ БЛОКА СИЕНИТО-ДИОРИТОВ АЛМАЛЫКСКОГО РАЙОНА

Летом 1971 г. работы по крупноплановому геологическому эксперименту в Алмалыкском районе были продолжены. На этот раз объектом неоднородного нагревания стали сиенито-диориты, являющиеся для Алмалыкского рудного района одними из ведущих рудовмещающих пород. Эксперимент 1971 г. имел много общего с аналогичными работами на лессах. Общими были задачи, организация работ, методы анализа и т. д. Отличия заключались лишь в частных деталях, обусловленных прежде всего различиями сред и схем нагревания.

### Выбор экспериментального блока и его исходные геологические особенности

Выбор блока сиенито-диоритов для эксперимента был обусловлен, во-первых, широким развитием этих образований в Алмалыкском рудном районе и их значительной ролью как рудовмещающих пород. При этом сиенито-диориты, вмещающие отдельные рудные тела и месторождения в целом, активно участвовали в развитии эндогенного процесса, заметно влияя как на геохимические и физико-химические особенности гидротермальной системы, так и на общий характер гидродинамического и теплофизического режима всей области рудообразования. Во-вторых, концентрация изучавшихся при эксперименте рудных компонентов в сиенито-диоритах с учетом их возможного перераспределения в процессе нагревания вполне удовлетворяла требованиям используемых нами методик количественного спектрального анализа.

Как выяснилось в процессе бурения и особенно после вскрытия экспериментального блока по осевой линии, блок в структурном отношении неоднороден (рис. 18). Наряду с участками, сложенными относительно монолитными сиенито-диоритами с редкими «сухими» трещинами, выделяются тектонически хорошо проработанные зоны (I—V).

Отчетливо проявлена зона I в районе 1-го нагревателя, имеющая мощность около 1,5 м и представленная серией четких тектонических трещин (преимущественные азимуты падения 180—190°, угол 75—90°) с глиной трения и заключенными между ними блоками интенсивно подробленных и трещиноватых пород.

Тектоническая зона II мощностью около 0,5 м имеет азимут падения 230° при угле 50—60°. Представлена системой сближенных, кулнсообразно расположенных трещин, в пределах которых сиенито-диориты интенсивно ожелезнены. В всячем боку зоны фиксируются отдельные оперяющие трещины (азимут падения 350—360°, угол 45—55°) и участки сильно давленных пород. В целом зона II по сравнению с зоной I выделяется более отчетливо среди монолитных слабо трещиноватых сиенито-диоритов. На глубине, судя по элементам залеганий, эти две тектонические зоны, очевидно, сопрягаются.

Менее отчетливо проявлены две другие зоны (III и IV), представленные соответственно участками интенсивно подробленных пород с отдельными карбонатными прожилками мощностью до 2—3 см и участком сгущения преимущественно «сухих» трещин различной пространственной ориентировки (несколько преобладают трещины с азимутом падения 80—90° и углом около 80°). Зона IV не имеет четких границ; ее ориентировочная мощность 2,5 м.

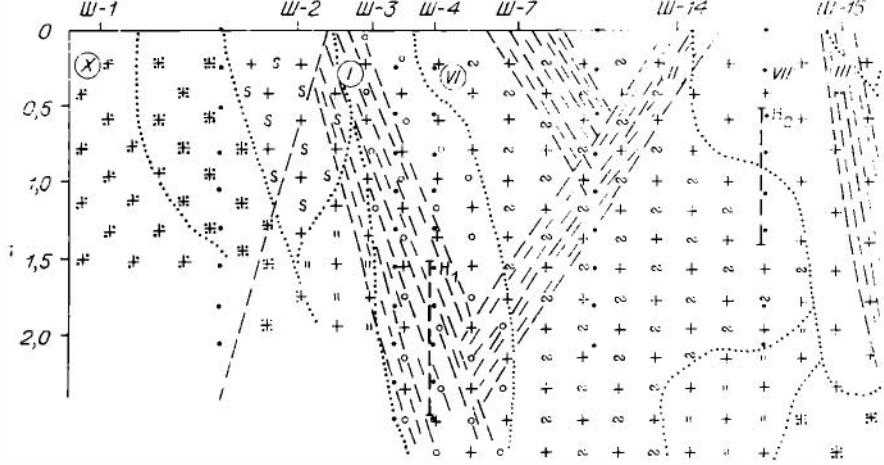


Рис. 18. Геологические и тектонические

Ш-1...Ш-29 — шпурь; I—X — тектонические элементы; 1 — зоны трещиноватости; 2 — наплаза по трещинкам; 6 — осветление

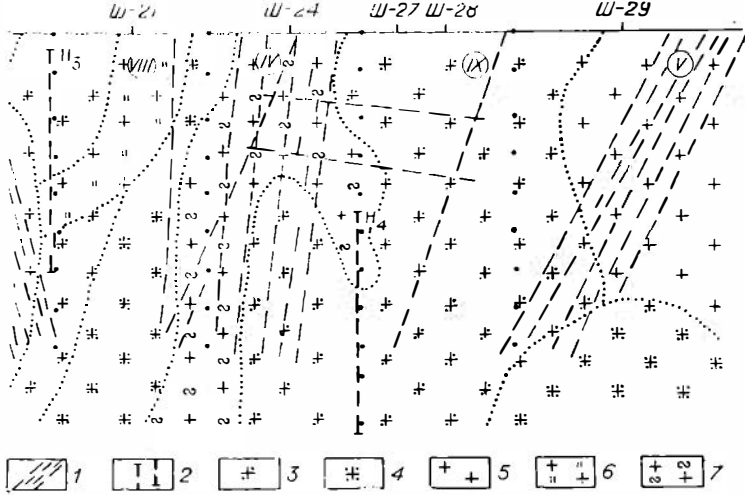
Наконец, выделяется выходящая уже за пределы экспериментального блока тектоническая зона V (азимут падения  $250^\circ$ , угол около  $70^\circ$ ), представленная зоной интенсивно перетертых и ожелезненных сиенито-диоритов.

Наиболее проницаемые из всех тектонических зон зоны II и III, а также, возможно, V. Учитывая пространственное расположение зон в пределах экспериментального блока (особенно относительно нагревателей), наибольшее влияние на гидродинамический и теплофизический режим следует ожидать со стороны двух первых.

Сиенито-диориты экспериментального блока представлены преимущественно массивными, крупно- или среднезернистыми разностями (см. рис. 18). В отдельных участках удается подметить в них очень слабые признаки флюиальности за счет грубой ориентировки биотита. В свежем виде порода имеет розовато-серую окраску за счет относительно равномерного распределения биотита. Незначительная калишпатизация сиенито-диоритов приводит к смене розовато-серого цвета розовым. Зеленоватая окраска свойственна хлоритизированным и частично эпидотизированным разностям.

Сиенито-диориты по всему блоку пронизаны мелкой, различно ориентированной сетью трещин, по стенкам которых, особенно в приповерхностной части, развиваются гидроокислы железа. В области нагревателя 1 участок блока наиболее трещиноват. Здесь встречаются кварц-карбонатные прожилки с эпидотом мощностью до 1 см.

При микроскопическом изучении сиенито-диоритов четко устанавливается их гипидиоморфная структура с идиоморфизмом плагиоклаза. Главные породообразующие минералы сиенито-диоритов представлены плагиоклазом, калиевым полевым шпатом, биотитом и кварцем. Постоянными аксессуориями в породе являются апатит, сфен, циркон, магнетит. Из вторичных минералов отмечаются серицит, хлорит, эпидот, кварц, пелит. Плагиоклаз и калиевый полевой шпат — преобладающие минералы. Они содержатся приблизительно в равных количествах и составляют около 75—85% от общего объема породы. Плагиоклаз представлен призматическими кристаллами и реже неправильными изометричными зернами с полисинтетическими двойниками.



### особенности блока сиенито-диоритов.

греватели; 3 — ожелезнение; 4 — калишпатизация; 5 — осветление и развитие окислов железа и дробление; 7 — хлоритизация.

Свежие плагиоклазы, не затронутые вторичными процессами, встречаются редко. Они почти всегда в какой-то мере изменены, чаще всего серицитизированы. Наиболее свежие плагиоклазы установлены в сиенито-диоритах восточной части экспериментального блока. Здесь серицит развивается по плагиоклазам либо равномерно в виде отдельных тонких чешуек, либо в виде обособленных пятен и гнезд в центральных или краевых частях кристаллов. Нередко минерал загрязнен мелкими зернами кальцита.

В западной, наиболее тектонически ослабленной зоне блока, плагиоклаз сиенито-диоритов оказывается более измененным. Здесь по плагиоклазу кроме серицита интенсивно развивается кальцит, кварц, эпидот.

Калиевый полевой шпат типа ортоклаза (редко встречаются простые двойники) обычно выполняет интерстиции между зернами плагиоклаза и биотита и, как правило, бывает изменен. Зерна ортоклаза пелитизированы. При этом пелитизация наиболее интенсивно проявилась около нагревателя 4, близ его контакта. Здесь глинистый компонент в ортоклазе распределяется в виде отдельных неправильных пятен. При приближении к нагревателю небольшие по величине пелитовые пятна укрупняются, а глинистый материал буреет. В западной части экспериментального блока, т. е. в районе нагревателя, наблюдается интенсивное окварцевание калишпата.

Постоянным цветным минералом сиенито-диоритов является биотит, представленный отдельными чешуйками с хорошо видимой спайностью (0001) и с четким плеохроизмом от темно-коричневого по  $N_g$  до светложелтого по  $N_r$  или их небольшими скоплениями. Минерал слабо деформирован: листочки изогнуты, погасание волнистое.

Биотит почти всегда в какой-то мере разложен. На ранней стадии изменения резкий плеохроизм биотита нарушается, окраска становится более темной. В дальнейшем плеохроизм исчезает практически полностью и минерал становится почти изотропным. По биотиту развивается хлорит с выделением большого количества мелких зерен магнетита.

Процесс хлоритизации в той или иной степени захватывает сиенито-диориты всего экспериментального блока, однако наиболее сильное

его развитие фиксируется в областях II—IV. Хлорит обычно развивается с периферии чешуек биотита, проникая вглубь по трещинкам спайности, но нередко в породе встречаются и такие индивиды, в которых хлорит представлен неправильными скоплениями чешуек в центральных его частях. Отмечаются также скопления чешуйчатого хлорита в ассоциации с кальцитом и эпидотом в трещинках, развивающихся по породе в целом.

Гидроокислы железа, фиксируемые в виде хлопьевидных и натечных образований, развиты по всему блоку, концентрируясь как вокруг аксессуарных рудных минералов, так и по трещинкам.

### СХЕМА ПОЛЕВОГО ЭКСПЕРИМЕНТА, ИЗМЕРЕНИЯ И ОПРОБОВАНИЕ

Экспериментальная площадка длиной около 20 м была заложена на коренном выходе сиенито-диоритов. После расчистки площадки на ней по длинной оси были пробурены измерительные, картировочные и нагревательные скважины. На рис. 19 приведена схема проходки скважин и шпуров с указанием их номеров и глубин. Всего было пройдено 9 скважин диаметром 80—100 мм и глубиной до 4 м и 29 шпуров глубиной до 1,7 м. Все шпуров и скважины опробовались.

Нагревание блока пород проводилось четырьмя нагревательными устройствами в скважинах 3, 5, 6 и 8. Нагреватели в виде спиралей изготовлялись из нихромовой проволоки диаметром 4 мм. Все нагреватели включались последовательно через автотрансформатор и термореле.

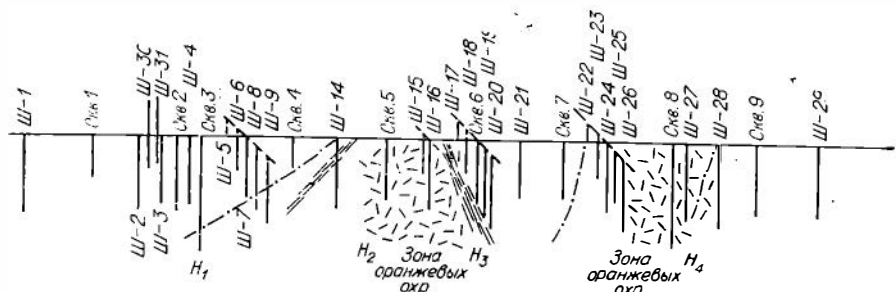


Рис. 19. Схема разбуривания блока сиенито-диоритов.

гулятор к сети с напряжением в 380 V. В связи с использованием довольно мощных нагревателей и высокого напряжения нагрев до установленной температуры происходил довольно быстро. Нагрев продолжался с 3 по 12 октября 1971 г. Максимальный нагрев достигал 900°C. Средняя мощность одного нагревателя 10 kW.

Отметим, что не все нагреватели работали полностью с 3 по 12 октября 1971 г. При этом до 10 октября средняя температура на нагревателях не превышала 700—720°C, 11 октября она достигала 800°C (мощность двух оставшихся нагревателей была 54 kW). 12 октября температура четвертого нагревателя достигла 900°C (при мощности 62 kW).

Температуру в объёме экспериментального блока измеряли в 72 точках и записывали автоматическими потенциометрами.

Из-за высокого напряжения во время нагревания вход на площадку был закрыт и другие теплофизические параметры блока не измерялись.

До начала эксперимента для количественного спектрального анализа по главному осевому профилю было отобрано 139 проб. Из шпуров отбирался шлам через 0,5 м, а пробы из скважин — через 0,25 м. Кроме этого, отбирались образцы пород для петрографического анализа. После окончания эксперимента с использованием взрывных работ была вскрыта вертикальная плоскость по главной оси, которая была опробована (отобрана 241 проба) по равномерной сетке  $1 \times 0,2$  м и отдельным детальным профилям. Каждая область блока, прилегающая к нагревателю, детально опробовалась короткими профилями с отбором образцов через 5—15 см. Сразу же после окончания эксперимента и вскрытия вертикальной плоскости были отобраны образцы пород на влажность.

## ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО БЛОКА ПЕРЕД ОКОНЧАНИЕМ ОПЫТА

### Распределение температур

В вертикальном разрезе экспериментального блока выделены четыре области нагрева I—IV, и изотермами 50, 100 и 300°C показано поле температур (рис. 20). Оказалось, что в экспериментальном блоке имеет место своеобразная искусственная «термоантиклиналь» (термоаномалия), в которой области нагрева (или очаги нагрева) I и IV смещены вниз, а очаги нагрева II, III расположены ближе к поверхности. Общая область нагревания, имеющая форму антиклинали, лежит в пределах изограды 50°C. Однако изограда 100°C в этой термоаномалии

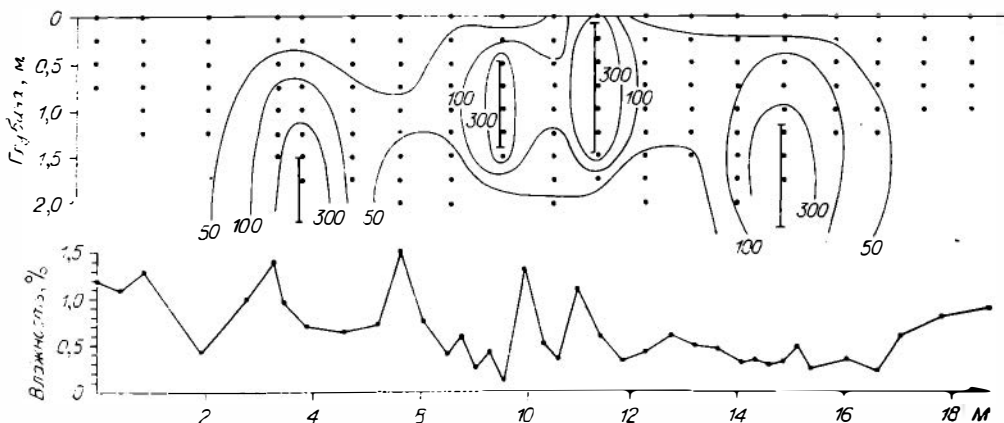


Рис. 20. Распределение температуры и влажности пород в блоке снепто-диоритов.

ли выделяет уже три локальных ядра I, II—III и IV. Изограда же 300°C разделяет эту термоаномалию на четыре очага (по количеству нагревателей). При дальнейшем анализе распределения рудных элементов выделены следующие зоны нагревания пород, °C: 1) <50; 2) 50—100; 3) 100—300 и 4) >300.



Распределение влажности пород (см. рис. 20, табл. 14) в экспериментальном блоке после нагревания весьма своеобразно. Абсолютные значения влажности меняются от 0,1% (обр. 1206) до 1,5% (обр.

Таблица 14  
Влажность сиенито-диоритов после нагревания, %

№ образца	Влажность	№ образца	Влажность	№ образца	Влажность	№ образца	Влажность
1197	1,20	В-3	0,35	1203	0,72	В-12	0,34
1196	1,10	В-4	1,10	1200	1,50	В-13	0,30
1198	1,30	В-5	0,60	1191	0,75	В-14	0,34
1205	0,43	В-6	0,33	1193	0,40	В-15	0,50
1204	1,00	В-7	0,43	1201	0,26	В-16	0,26
1204 <sup>1</sup>	1,40	В-8	0,60	1207	0,43	В-17	0,35
1194	0,96	В-9	0,50	1206	0,12	В-18	0,22
1195	0,70	В-10	0,47	В-1	1,30	В-19	0,60
1199	0,65	В-11	0,33	В-2	0,50	В-20	0,80
						В-21	0,90

1200). Непосредственно вблизи очагов нагревания влажность пород понижена. Так, около нагревателя Н<sub>1</sub> влажность пород равна 0,7% (обр. 1195, 1199, 1203), а у удаленных пород — 1,3—1,5%; для нагревателей Н<sub>2</sub> и Н<sub>3</sub> соответственно 0,3 и 1,0—1,2 и т. д. Из зоны интенсивного нагревания наблюдается отгонка свободной влаги. Влажность пород при этом уменьшается в 2—3 раза.

Таблица 15  
Характеристика локальных аномалий влажности у нагревателей

Нагреватель	Расстояние до локального максимума, см	Приращение влажности, %
Н <sub>1</sub>	60	0,7
Н <sub>2</sub>	50	1,2
Н <sub>3</sub>	40	0,8
Н <sub>4</sub>	15	0,2

Важной особенностью изменения влажности пород, подвергшихся нагреванию, является то, что около каждого нагревателя на расстоянии 0,2—0,5 м формируется локальный максимум влажности пород. На профиле влажности (см. рис. 20, табл. 15) это отчетливо проявляется.

### ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РУДНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМ БЛОКЕ ДО И ПОСЛЕ НАГРЕВАНИЯ

Детальный материал опробования, геологического и структурного изучения экспериментального блока позволили исследовать некоторые частные закономерности распределения рудных компонентов в породах опытного участка: а) распределение элементов по разновидностям сиенито-диоритов; б) анализ поведения рудных элементов в отдельных структурных областях блока; в) изменение концентрации элементов с глубиной и в областях нагревания; г) поведение рудных элементов по зонам нагревания; и некоторые другие.

#### Поведение рудных элементов в пределах экспериментального блока

В результате нагревания среднее содержание отдельных элементов в объеме блока увеличивается или уменьшается (табл. 16, прил. IV). Наибольшие изменения характерны для Zn и Cu, средние содержания которых в объеме блока сокращаются соответственно на 8,9 и 5,8 г/т.

Несколько увеличивается (на 1,5 г/т) среднее содержание Ni. Изменения средних содержаний других изучавшихся рудных элементов (Pb и Mo сокращаются соответственно на 0,6 и 0,2 г/т; Co — увеличивается на 0,1 г/т) незначительны.

Представляет интерес перераспределение рудных элементов непосредственно в областях нагревания. Статистические параметры распределения элементов в породах в пределах четырех зон нагревания (до и после нагревания) и данные изменения средних содержаний в процессе нагревания см. табл 16—22.

Для таких элементов, как Ni и отчасти Mo, характерно относительное увеличение среднего содержания в областях нагревания; средние же содержания Cu, Zn, Pb в этих зонах сокращаются. Поведение кобальта по данным областям не равнозначное (см. табл. 16).

При этом характер перераспределения отдельных элементов в разных областях нагревания как в количественном, так и в качественном отношении неодинаков. Здесь наряду с влиянием нагревания, безусловно, сказываются структурные особенности этих зон, литологические и физико-механические особенности слагающих их пород. В частности, из общих закономерностей несколько выпадает область нагревателя 3, где в отличие от других фиксируется некоторое возрастание средних содержаний Cu, Zn и Pb относительно исходных. Здесь же установлено максимальное увеличение средних содержаний Co и Ni. Среднее содержание Mo в данной области, как и в области нагревателя 4, несколько сокращается. Таким образом, область нагревателя 3, если исключить Mo, является областью повышенной концентрации рудных элементов (табл. 17, прил. V).

Т а б л и ц а 17

Изменения содержаний элементов (г/т) в областях нагрева экспериментального блока

Область нагрева, число проб	Cu	Mo	Pb	Co	Ni	Zn	Сумма
I, n=97	-3,9	+0,4	-10,6	+1,3	+0,3	-10,3	-22,8
II, n=65	-31,6	+0,4	-3,0	-6,1	+0,1	-11,6	-51,8
III, n=50	+5,6	-0,1	+10,3	+2,9	+4,0	+0,2	+29,9
IV, n=85	-17,1	-1,0	-5,2	-1,8	+0,3	-8,6	-33,4

Если оценивать в целом перераспределение рудных элементов в областях нагревания, то здесь можно отметить некоторую аналогию с поведением средних содержаний этих элементов в пределах всего экспериментального блока до и после нагревания (см. табл. 17). В пределах областей нагревания эти перераспределения проявляются более контрастно. Поведение других элементов менее характерно:

Объем	Mo	Cu	Pb	Zn	Ni	Co	Сумма
Блок . . .	-0,2	-3,8	-0,6	-8,9	+1,5	+0,1	-13,9
Область нагревания	-0,3	-47,0	-8,5	-30,3	+4,7	+3,7	-89,4

Генеральные средние содержания рудных элементов по всему блоку сиенито-диоритов, г/т

Элемент	До нагревания, n=139	После нагревания, n=241	Приращение рудных
Pb	33,5 (±2,1)	32,9 (±2,2)	-0,6
Co	14,4 (±0,7)	14,5 (±0,6)	+0,1
Zn	44,6 (±1,2)	35,7 (±0,8)	-8,9
Ni	8,1 (±0,3)	9,6 (±0,4)	+1,5
Cu	50,8 (±0,3)	45,0 (±0,2)	-5,8
Mo	3,0 (±0,4)	2,8 (±0,1)	-0,2
Сумма	154,4	140,5	-13,9

Пр и м е ч а н и е. (±) — ошибка среднего г/т.

## Изменение средних содержаний рудных компонентов с глубиной

Статистические материалы по распределению рудных элементов с глубиной для всего блока приведены в табл. 18, 19. Для исходного блока пород измененные средних содержаний шести рудных элементов (прил. VI—IX) прослежено на глубину 2,25 м (через 0,25 м). Оказалось, что для Ni, Co и Zn наиболее характерно относительно плавное снижение содержаний с глубиной. Для Pb, Cu и Mo, наоборот, характерны более дифференцированные изменения средних содержаний с глубиной. На графиках выделяются острые максимумы содержаний (см. рис. 11).

Для Pb максимум зафиксирован на глубине 0,75 м, где содержание его возрастает от 0,00318 до 0,00479%. На глубине 2,25 м его количество уменьшается почти в три раза (до 0,00115%).

Таблица 18

**Изменение средних содержаний элементов (г/т) в породах экспериментального блока по глубине в результате нагревания**

Элемент	Уровень								
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
Cu	-9,8	-4,4	-2,5	-8,4	+2,7	-15,6	-20,3	+2,2	-12,6
Mo	+0,22	+0,13	-0,97	+0,46	+0,09	-2,91	+1,00	+1,10	+0,57
Pb	+12,7	+2,9	-14,0	-11,8	+3,3	-8,0	+0,7	+8,3	+19,6
Co	+0,6	+0,3	-0,7	-5,1	+1,4	-4,1	-0,1	+1,1	+5,0
Ni	-0,5	+1,2	+2,8	+1,8	+2,9	+0,2	+2,1	+0,6	+2,8
Zn	-17,2	-12,6	-9,1	-5,9	-7,9	-4,1	+0,4	+0,4	+1,0
Сумма рудных . . . .	-14,0	-12,5	-24,5	-28,9	+3,9	-30,1	-20,7	+13,6	+16,4

Повышенные количества Mo наблюдаются на глубинах 0,75 и особенно 1,5 м. В дальнейшем количество Mo постепенно падает до 0,00016% (на глубине 2,25 м).

Максимум средних содержаний Cu приурочен к глубинам в 1,75 м. Содержание металла здесь достигает 0,00656% (при генеральном среднем

Таблица 19

**Изменения средних содержаний элементов в областях нагревания на разных глубинах, г/т**

Элемент	Уровень							
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
Cu	-11,0	-3,7	-3,2	-3,4	+0,2	+19,7	+33,0	+3,9
Mo	0	+0,42	-1,14	+0,58	+0,13	-3,89	+0,64	+1,28
Pb	+18,6	+2,6	-16,0	-14,0	+3,4	-8,7	+1,8	+8,2
Co	0	-0,3	-1,9	-6,5	+1,7	+4,3	-1,2	+1,1
Ni	-0,4	-0,1	+3,1	+1,3	+3,7	+0,1	+2,3	+0,8
Zn	-14,2	-11,1	-8,4	-2,7	-4,6	-6,6	-6,4	+1,8
Сумма рудных . . . .	-7,0	-12,2	-27,5	-24,7	+4,5	+4,9	+30,1	+28,6

0,00508%). На наиболее глубоких горизонтах (2 и 2,25 м) среднее содержание  $\text{Cu}$  также понижено.

Таким образом, в целом для рудных элементов в экспериментальном блоке перед проведением опыта средние содержания с глубиной сокращаются, что особенно отчетливо фиксировалось для горизонтов 2 и 2,25 м.

После нагревания произошла существенная перегруппировка элементов в вертикальном разрезе блока. Так, для большинства уровней (исключая V, VIII и IX) наблюдается суммарный вынос рудных элементов относительно их исходных количеств. Для всех уровней общий баланс в содержании рудных отрицательный и составляет 98,2 г/т.

Перераспределение отдельных рудных элементов на разных глубинных уровнях в процессе эксперимента имеет свою специфику. Для  $\text{Ni}$ , за исключением приповерхностного уровня I, во всех случаях отмечается увеличение средних содержаний с максимальными приращениями на глубинах 0,75; 1,25; 1,75 и 2,25 м. Если учесть снижение средних содержаний  $\text{Ni}$  с глубиной, отмечавшееся в исходных породах, то можно говорить об относительно высоких приращениях количества элемента на более глубоких горизонтах. Последнее наряду с общим возрастанием среднего содержания  $\text{Ni}$  во всем экспериментальном блоке после его нагревания является свидетельством привноса этого элемента из глубоких горизонтов, находящихся за пределами экспериментального блока.

На большинстве уровней фиксируется также некоторое возрастание количеств  $\text{Mo}$ . Однако эти приращения, как правило, незначительные и перекрываются (как было отмечено выше, среднее содержание  $\text{Mo}$  по всему блоку после эксперимента сокращается всего на 0,2 г/т) сокращениями количества элемента на III и особенно на VI уровнях. Именно эти уровни характеризовались максимумами количеств  $\text{Mo}$  в исходном блоке. Наибольшие приращения  $\text{Mo}$  после нагревания зафиксированы для глубинных уровней (VII, VIII и отчасти IX), непосредственно примыкающих к области максимальной его концентрации в исходном блоке.

Неравномерно распределяется после нагревания  $\text{Co}$ . Наряду с уровнями, в пределах которых сокращается его среднее содержание (уровень IV), отчетливо выделяются уровни (VI и особенно IX) с заметным приращением количеств этого элемента.

Максимальное приращение на уровне IX отмечено также и для  $\text{Pb}$ . Для него фиксируются и другие уровни с возросшим средним содержанием — это приповерхностный уровень I и глубинный уровень VIII. Наибольший вынос элемента устанавливается для уровней III, IV и VI.

Для  $\text{Zn}$ , за исключением глубинных уровней VIII и IX, где зафиксировано незначительное приращение средних содержаний элемента, характерен вынос, достигающий максимальных значений в приповерхностных уровнях I, II и III. Здесь создавались наиболее благоприятные условия для «вывода» элемента за пределы экспериментального блока.

Заметный вынос для большинства уровней (некоторое приращение элемента установлено для уровней V и VIII) отмечается и для  $\text{Cu}$ , которая, как и  $\text{Zn}$ , в процессе эксперимента выносятся из блока. Очевидно, при увеличении объема экспериментального блока (углубления нагревателей) на его верхних горизонтах могли создаваться благоприятные условия для концентрации этих выносимых из областей нагревания рудных элементов.

Если рассматривать среднее содержание суммы рудных элементов, то здесь по приращениям заметно выделяются глубинные уровни IX и VIII. Некоторое приращение количества вещества отмечается и для уровня V. На всех других уровнях сумма рудных элементов сокращается (преимущественно за счет выноса  $\text{Zn}$  и  $\text{Cu}$ ).

Для оценки поведения рудных элементов в областях нагревания по уровням глубинности проведена статистическая обработка данных опробования областей нагревания ( $H_1 + H_2 + H_3 + H_4$ ) до и после эксперимента. Выборки объединяли области нагревания по отдельным уровням глубины. Для того чтобы облегчить анализ полученных данных, сделаны дополнительные расчеты по изменению средних содержаний рудных элементов в областях нагревания на разных глубинных уровнях по блоку и по областям нагрева:

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	Сумма
Блок в целом . . . . .	-14,0	-12,5	-24,5	-28,9	+3,9	-30,1	-20,7	+13,6	-113,2
Области нагревания . . . . .	-7,0	-12,2	-27,5	-24,7	+4,5	+4,9	+30,1	+28,6	-3,3

По областям нагревания отмечается общее увеличение содержания суммы изучавшихся рудных компонентов на глубинных уровнях с максимумом приращения на уровнях VII и VIII. Для верхних уровней установлено сокращение количества вещества. В целом баланс суммы рудных компонентов по уровням обусловлен в основном изменением содержания Cu и Zn, перераспределение которых в экспериментальном блоке в процессе нагревания наиболее значительно. Именно для этих двух элементов устанавливается заметный вынос из верхних уровней, и только в глубоких горизонтах областей нагревания (для Cu уровни VI, VII, VIII и отчасти V; для Zn только уровень VIII) среднее содержание данных компонентов относительно повышается.

Среди исследованных элементов отчетливо выделяется Ni, образующий относительно повышенные концентрации в пределах большинства уровней. Только на двух приповерхностных уровнях (I и II) его средние содержания несколько ниже по сравнению с исходными.

Поведение Mo, Pb и Co по уровням в областях нагревания несколько усложняется за счет чередования по уровням приращения и выноса элементов. Однако и здесь для Co, если исключить уровень VII, в пределах которого среднее содержание относительно исходного понижается, намечается тенденция к общему выносу элемента из верхних уровней с некоторой концентрацией на глубине.

Для Pb намечаются два отчетливых максимума приращения содержаний на уровне I и VIII. В пределах последнего уровня, захватывая отчасти уровень VII, наиболее концентрируется и Mo. Максимальное снижение средних количеств Mo и Pb приходится на один и тот же уровень (VI). Для Mo это уровень наибольших концентраций элемента в исходном блоке (здесь его содержание было в 2—3 раза больше по сравнению с содержаниями на других уровнях).

Если сопоставить общий характер изменения средних содержаний суммы исследовавшихся элементов с глубиной по всему блоку и по областям нагревания, то отчетливо видно, что области нагревания в целом характеризуются менее заметным выносом вещества. Если же рассматривать уровни с глубины 1,25 м, то для областей нагревания устанавливается только принос суммы компонентов.

### Распределение рудных компонентов в разных типах сиенито-диоритов

Среди сиенито-диоритов выделены следующие разновидности, образовавшиеся под влиянием тех или иных наложенных процессов: I — ожелезненные; II — хлоритизированные; III — калишпатизированные; IV — осветленные и давленные; V — осветленные и богатые окислами железа.

На основе статистических параметров распределения рудных элементов в породах до нагревания рассчитаны средние приращения

Изменения содержаний рудных элементов (г/т) в разновидностях исходных сиенитодиоритов экспериментального блока

Тип породы	Pb		Co		Ni		Zn		Cu		Mo		Сумма приращений	Сумма рудных г.-154,4
	Г=33,5		Г=14,4		Г=8,1		Г=44,6		Г=50,8		Г=3,03			
	$\bar{X}$	$\Delta c$	$\bar{X}$	$\Delta c$	$\bar{X}$	$\Delta c$	$\bar{X}$	$\Delta c$	$\bar{X}$	$\Delta c$	$\bar{X}$	$\Delta c$		
I	35,8	+2,3	15,5	+1,1	11,7	+3,6	44,0	-0,6	55,6	+4,8	2,28	-0,75	+10,4	164,9
II	49,4	+5,9	17,3	+2,9	9,2	-1,1	50,4	+5,8	47,8	-3,0	2,08	-0,95	+11,7	176,2
III	23,1	-10,4	15,5	+1,1	7,9	-0,2	42,6	-2,0	43,7	-7,1	2,93	-0,1	-18,7	135,7
IV	19,4	-14,1	10,9	-3,5	5,4	-2,7	38,1	-6,5	48,3	-2,5	3,67	+0,64	-28,7	125,8
V	39,8	+6,3	15,4	+1,0	10,4	+2,3	44,6	0	62,5	+11,7	4,16	+1,13	+22,4	175,9

содержаний для всех элементов по разновидностям сиенитодиоритов. Приращения  $\Delta C$  рассчитаны от генеральных средних по всему блоку (табл. 20, прил. X).

Ожелезненные разновидности пород (тип I) характеризуются увеличением содержания Pb, Co, Ni и Cu на величину до 35%, количество Zn и Mo в них относительно понижено. Суммарное приращение для всех рудных составило 10,4 г/т (около 15% по сравнению с генеральной средней). Эта тенденция проявлена и в V типе пород. Здесь суммарный прирост концентрации рудных компонентов составил 22,4 г/т.

Суммарный прирост вещества наблюдается и в хлоритизированных породах (тип II), где он равен 11,7 г/т, однако содержание Cu и Mo в этой разновидности пород несколько уменьшается.

III и IV типы пород характеризуются пониженными средними содержаниями суммы рудных компонентов. Для пород III типа отклонение от генерального среднего составляет 18,7 г/т и для IV типа — 28,7 г/т. В калишпатизированных породах (тип III) наблюдается обогащение Co (+1,1 г/т), а в осветленных породах (тип IV) несколько (+0,6 г/т) возрастает содержание Mo.

Из всех рассматриваемых рудных элементов особо выделяется Zn, среднее содержание которого в процессе нагревания уменьшилось во всех разновидностях сиенитодиоритов. Максимум выноса приходится на хлоритизированные и калишпатизированные породы, в которых после нагревания количество элемента сокращается соответственно на 14 и 12,2 г/т (табл. 21, прил. XI).

Поведение других элементов в различных разновидностях сиенитодиоритов при нагревании экспериментального блока неоднозначно. Из

Таблица 21

Изменение среднего содержания рудных элементов (г/т) в породах разного типа в результате нагревания

Тип породы	Cu	Mo	Pb	Co	Ni	Zn	Сумма рудных		Сумма приращений
							исходные	после нагрева	
I	-5,6	+0,4	+5,1	-0,4	-1,5	-8,1	164,9	154,8	-10,1
II	-14,5	+0,8	-25,3	-1,5	+2,1	-14,0	176,2	123,8	-52,4
III	+10,2	-0,6	+0,5	-0,8	+1,4	-12,2	135,4	134,2	-1,2
IV	+2,0	-0,5	+3,7	+4,1	+2,6	-6,9	125,8	130,8	+5,0
V	-20,6	-1,5	+5,6	-0,8	-1,1	-4,3	176,9	154,2	-22,7

пород, обогащенных гидроокислами Fe, в большинстве случаев отмечается вынос компонентов. В частности, из осветленных сиенито-диоритов, богатых гидроокислами железа (тип V), зафиксирован вынос пяти элементов (включая Zn) из шести изучавшихся. Только для Pb в этой разновидности пород устанавливается приращение среднего содержания на 5,6 г/т.

Для другой разновидности сиенито-диоритов (тип I) сокращение среднего содержания изучавшихся элементов отмечено в четырех случаях. Здесь так же, как и для пород V типа, отмечается возрастание среднего количества Pb; несколько (+0,4 г/т) увеличивается и среднее содержание Mo.

Такое преимущественное выщелачивание рудных компонентов из пород, в разной степени ожелезненных, обусловлено, очевидно, сорбционной формой нахождения элементов в этих породах (адсорбция гидроокислами железа) и их высвобождением в результате десорбции в процессе нагревания.

Третьим по степени сокращения среднего содержания элементов стоит II тип пород, именно из этой разновидности больше всего выносятся Pb (-25,3 г/т) и Co (-1,5 г/т). Это единственные породы, из которых выносятся Pb.

Среди всех пород выделяются осветленные и подробленные сиенито-диориты (IV тип), где увеличивается как общее содержание рассматриваемых компонентов, так и среднее содержание большинства элементов (за исключением Zn и Mo). Это единственная разновидность сиенито-диоритов, в которой после нагревания общее количество элементов возросло со 125,8 до 130,8 г/т. Выщелачивания Zn и Mo из этих пород по сравнению с другими минимальное. Преимущественное накопление элементов среди пород IV типа обусловлено их хорошей структурной подготовленностью.

Относительно устойчивы к выщелачиванию рассматриваемых элементов калишпатизированные разности сиенито-диоритов. Это, по-видимому, объясняется тем, что уже в процессе калишпатизации, идущем обычно с выносом малых и редких элементов, наиболее подвижные формы изучаемых компонентов были выщелочены. Суммарное среднее содержание рудных элементов в калишпатизированных сиенито-диоритах после нагревания незначительно ниже исходного количества (-1,2 г/т) в основном за счет выщелачивания Zn.

### **Изменение содержания рудных элементов в зависимости от тектонического строения**

Десять локальных структурных областей, выделенных при геологической съемке экспериментального блока, можно сгруппировать в две контрастные группы: а) зоны смятия и дробления (элементы с I по V), б) блоки более монолитных пород (элементы с VI по X).

Анализ исходных статистических материалов для выборок по структурным элементам блока проведен путем сравнения средних статистик элементов после нагревания со средними генеральными для всех пород блока, не претерпевших общий нагрев; со средними генеральными пород блока, претерпевших нагрев; и со средними для каждого типа структурных областей до и после нагревания (прил. XII, XIII).

**Сравнение с генеральной средней для блока в целом до нагревания** показывает, что отдельные структурные области уже в исходном состоянии значительно отличаются друг от друга по содержанию рудных компонентов. Так, минимальные суммарные содержания (г/т) элементов характерны для областей I (118,4); III (123,2) и X (129,5).

Сравнение рудных элементов в структурных областях с генеральной средней ( $\Gamma$ ), (г/т)

Область нагрева	Pb		Co		Ni		Zn		Cu		Mo		Сумма рудных, $\Gamma=154,4$	Сумма приращений рудных
	$\Gamma=33,5$		$\Gamma=14,4$		$\Gamma=8,1$		$\Gamma=44,6$		$\Gamma=50,8$		$\Gamma=3,03$			
	$\bar{X}$	$\Delta C$	$\bar{X}$	$\Delta C$	$\bar{X}$	$\Delta C$	$\bar{X}$	$\Delta C$	$\bar{X}$	$\Delta C$	$\bar{X}$	$\Delta C$		
I	13,6	-19,9	8,4	-6,0	4,2	-3,9	36,8	-7,8	52,3	+1,5	3,06	+0,03	118,4	-36,4
II	30,0	-3,5	15,9	+1,5	9,4	+1,3	47,8	+3,2	36,7	-14,1	1,93	-1,10	141,7	-13,0
III	20,5	-13,0	10,7	-3,7	7,4	-0,7	35,0	-9,6	47,5	-3,3	2,05	-0,98	123,2	-31,2
IV	41,5	+8,0	14,8	+0,4	8,4	+0,3	43,6	-1,0	40,0	-10,8	2,09	-0,94	150,4	-4,0
V	39,9	+6,4	18,5	+4,1	11,7	+3,6	50,9	+6,3	51,2	+0,4	2,52	-0,51	174,7	+20,3
VI	28,6	-4,9	12,6	-1,8	6,3	-1,8	42,2	-2,4	46,6	-4,2	3,41	+0,38	139,7	-14,7
VII	39,0	+5,5	17,1	+2,7	9,2	+1,1	47,6	+3,0	72,8	+22,0	2,15	-0,88	187,9	+33,5
VIII	24,0	-9,5	20,0	+5,6	7,4	-0,7	43,9	-0,7	61,1	+10,3	3,36	+0,33	159,8	+5,4
IX	56,8	+23,3	17,1	+2,7	11,2	+3,1	51,5	+6,9	56,7	+5,9	4,38	+1,35	197,8	+43,4
X	22,8	-10,7	9,7	-4,7	7,6	-0,5	41,0	-3,6	45,8	-5,0	2,59	-0,44	129,5	-24,9

Максимальные количества вещества были отмечены в следующих структурных областях (г/т): IV (150,4); V (174,7), VII (187,9), VIII (159,8) и IX (197,8). Промежуточные положения занимают области II—141,7 и VI—139,7 г/т.

Если сравнить полученные суммарные содержания рудных элементов (табл. 22) с генеральной средней для всего исходного блока (154,4 г/т), видно, что выделенные области характеризуются различными тенденциями в поведении рудных компонентов. Так, для областей I, III, X характерны наиболее низкие концентрации (до -36,4 г/т) рудного вещества. В областях II и VI (отчасти и IV) снижение суммы элементов относительно генерального среднего менее проявлено. Области V, VII, VIII и IX выделяются более высокой концентрацией рудных компонентов. Приращение среднего содержания элементов в последних областях может достигать +43,4 г/т.

**Сравнение с генеральной средней для всего блока пород после нагревания** дает возможность проанализировать динамику поведения рудных элементов в структурных областях в связи с нагреванием экспериментального блока (табл. 23). Сравнение проведено по отношению к генеральной средней ( $\Gamma_1$ ), высчитанной для всех пород блока, претерпевших нагревание. С этой генеральной средней сравнивались средние частных выборок по отдельным областям структур.

Проведем вначале анализ суммарных содержаний рудного вещества (генеральная средняя после нагревания 140,5 г/т). В результате нагревания происходит дальнейшая дифференциация структурных областей по их рудной нагрузке.

Расчет средних содержаний и их приращений показал, что некоторые структурные области после нагревания резко изменили емкостные тенденции в отношении рудных элементов. Так, области I—IV и VIII стали относительно более благоприятными для концентрации элементов, а в областях V—VII, IX, X, напротив, зафиксировано относительное обеднение рудными компонентами.

При этом наиболее отчетливые отклонения в распределении рудных элементов установлены для зон смятия и дробления (области I—V). Если



Распределение рудных элементов (г/т) в структурных областях после нагревания

Область нагрева	Pb		Co		Ni		Zn		Cu		Mo		Сумма рудных элементов $\Gamma_1=140,5$	Приращение к $\Gamma_1$	Приращение к $\Gamma_2$ $\Gamma_2=154,4$
	$\Gamma_1=32,9 \pm 2,2$		$\Gamma_1=14,5 \pm 0,6$		$\Gamma_1=9,6 \pm 0,4$		$\Gamma_1=35,7 \pm 0,8$		$\Gamma_1=45,6$		$\Gamma_1=2,8 \pm 0,1$				
	$\bar{X}$	$\Delta$	$\bar{X}$	$\Delta C$	$\bar{X}$	$\Delta C$	$\bar{X}$	$\Delta C$	$\bar{X}$	$\Delta C$	$\bar{X}$	$\Delta C$			
I	25,4	-7,5	14,2	-0,3	8,1	-1,5	25,0	-10,7	60,0	+15,0	4,3	+1,5	137,0	-3,5	-17,4
II	38,5	-5,6	16,2	+1,7	12,5	+2,9	37,7	-2,0	30,4	-14,6	2,6	-0,2	137,9	-2,1	-16,5
III	31,8	-1,1	23,3	+8,8	10,0	+0,4	38,2	+3,5	71,1	+26,1	3,3	+0,5	178,7	+38,2	+24,3
IV	45,2	+12,3	17,4	+2,9	11,8	+2,2	37,8	+2,1	39,8	-5,2	2,9	+0,1	154,9	+14,4	+0,5
V	34,9	+2,0	16,4	+1,9	9,5	-0,1	35,4	-0,3	43,0	-2,0	3,2	+0,4	142,4	+1,9	-12,0
VI	11,3	-21,6	13,6	-0,9	6,8	-2,8	28,6	-7,1	37,5	-7,5	3,0	+0,2	100,8	-39,7	-45,6
VII	36,8	-3,9	10,9	-3,6	9,4	-0,2	36,5	+0,8	45,1	+0,1	2,6	-0,2	141,3	+0,8	-13,1
VIII	35,2	+2,3	18,3	+3,8	11,4	+1,8	42,8	+7,1	64,0	+19,0	2,3	-0,5	174,0	+30,5	+19,6
IX	43,7	+10,8	14,5	0	9,5	-0,1	41,5	+5,8	40,3	-4,7	2,7	-0,1	152,2	+11,7	-2,2
X	21,6	-11,3	7,9	-6,6	7,9	-1,7	21,3	-14,4	43,2	-1,8	1,9	-0,9	103,8	-36,7	-50,6

в исходном блоке во всех этих зонах, за исключением V области, среднее содержание было ниже (для областей I—III значительно) генерального среднего, то после нагревания в двух областях (I и II) общее количество вещества оказалось лишь незначительно ниже генерального среднего после нагревания (табл. 24,  $\Gamma_1$ ), а в других — III и IV — даже превысило его (соответственно на 38,2 и 14,4 г/т). С другой стороны, для блоков более монолитных пород были зафиксированы иные соотношения. Здесь, за исключением области VIII, хорошо проявляется тенденция к сокращению суммы рудных элементов по сравнению с генеральным значением.

В результате длительного воздействия на экспериментальный блок локального поля температур из отдельных структурных областей может выщелачиваться до 46,6 г/т суммарного количества изучавшихся рудных компонентов и привноситься до 55,5 г/т (табл. 24), что составляет около 1/3 от исходного среднего количества рудного вещества.

При сравнении средних содержаний рудных элементов по структурным областям до и после нагревания (см. табл. 24,  $\Gamma_2$ ) видно, что для областей первой группы элементов (зоны смятия и давления) в процессе нагревания чаще характерно приращение вещества. Выпадает область V и отчасти область II, среднее содержание вещества в которых по сравнению с исходным при нагревании понижается соответственно на 32,3 и 3,8 г/т. Для более монолитных пород, исключая область VIII, где характерно суммарное приращение рудных компо-

## Суммарное приращение рудных (г/т) по отдельным структурным областям экспериментального блока

Генеральная средняя	Область									
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
$\Gamma$ - 154,4	-36,4	-13,0	-32,2	-4,0	-20,3	-14,7	+33,5	+5,4	-43,4	-24,9
$\Gamma_1$ - 140,5	-3,5	-2,1	+38,2	-14,4	+1,9	-39,7	+0,8	+30,5	+11,7	-36,7
$\Gamma_2$	-17,4	-16,5	+24,3	-0,5	-12,0	-45,6	-13,1	+19,6	-2,2	-50,6
$\Gamma_3$	+18,6	-3,8	+55,0	-4,5	-32,3	-38,9	-46,6	+14,2	-45,6	-25,7

нентов на 14,2 г/т, выщелачивание вещества достигает по отдельным областям до 46,6 г/т (область VII).

В целом в I—V структурных областях отмечается привнос всех рассматриваемых элементов, за исключением Zn — компонента, для которого вообще характерен вынос из экспериментального блока (табл. 25, 26). В этом отношении резко выделяется вторая группа структурных областей (области V—X), где, за исключением Ni, содержание которого после эксперимента возросло в целом по всему блоку, характерен вынос компонентов. При этом Zn выносится в заметно большем количестве, чем из областей I—V.

Поведение отдельных рудных элементов в структурных областях несколько различается. В первой группе особенно выделяется область III, где отмечен привнос всех изучавшихся, включая и Zn. Из всех других областей Zn выносится. Из отдельных областей (II, IV, V) выносятся также Cu. Резко выделяется среди группы рассматриваемых областей область V, для которой характерно не только снижение суммарного количества вещества по сравнению с исходным, но и вынос всех исследовавшихся элементов, за исключением Mo, содержание которого несколько повышается (на 0,7 г/т). По характеру перераспределения компонентов в процессе нагревания область V близка к областям, представленным участками монолитных пород. Учитывая разные структурные особенности этих областей (в частности, их различную проницаемость), можно предполагать, что в данном случае сказывается положение области V относительно очагов нагревания. Она располагается на периферии блока в удалении от очагов нагревания, т. е. фактически за пределами теплового поля, в зоне, где преобладает массоперенос, направленный к очагу нагревания.

Для областей второй группы (V—X) характерен вынос большинства элементов. Только лишь по отдельным областям устанавливается небольшой привнос. Однако это не маскирует общую отчетливо выраженную геохимическую тенденцию к выщелачиванию всех рассматриваемых компонентов, за исключением Ni, который, как и в области I—V, привносится, но в заметно меньшем количестве. Максимальный привнос его (+4,0 г/т) устанавливается для области VIII. Для этой же области характерен повышенный привнос Cu (+2,9 г/т) и особенно Pb (+11,2 г/т). В этом отношении, как и по общему увеличению суммарного содержания вещества, область VIII приближается к тектоническим элементам первой группы. Возможно, в данном случае сказались влияние активно действующего

Таблица 25  
Изменение среднего содержания элементов по группам структурных областей (г/т)

Элементы	Область	
	I—V	VI—X
Cu	+16,6	-52,9
Mo	+4,6	-3,5
Pb	+30,3	-22,6
Co	+19,2	-11,3
Ni	+11,2	+3,3
Zn	-38,0	-55,5

Особенности изменений средних содержаний рудных элементов в структурных областях до и после нагревания (г/т)

Элемент	Структура											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	I-V	VI-X
Cu	+7,7	-6,3	+23,6	-0,2	-8,2	-9,1	-27,7	+2,9	-16,4	-2,6	45,5	56,6
Mo	+1,2	+0,7	+1,2	+0,8	+0,7	-0,4	+0,4	-1,1	-1,7	-0,7	2,3	3,2
Pb	+11,8	+8,5	+11,3	+3,7	-5,0	-17,3	-2,2	+11,2	-1,31	-1,2	29,1	34,2
Co	+5,8	+0,3	+12,6	+2,6	-2,1	+1,0	-6,2	-1,7	-2,6	-1,8	13,6	15,3
Ni	+3,9	+3,1	+2,6	+3,4	-1,8	+0,5	+0,2	+4,0	-1,7	+0,3	8,2	8,3
Zn	-11,8	-10,1	+4,2	-5,8	-14,5	-13,6	-11,1	-1,1	-10,0	-19,7	42,8	45,4
Сумма средних до нагрева	118,4	141,7	123,2	150,4	174,7	139,4	187,9	159,8	197,8	129,5	141,6	163,1
Сумма средних после нагрева	137,0	137,9	178,7	154,9	142,4	100,8	141,3	174,0	152,2	103,8	—	—
Сумма приращений	+18,6	-3,8	+55,5	+4,5	-32,3	-38,9	-46,6	+14,2	-45,6	-25,7	—	—

нагревателя (скв. 6), расположенного в верхней части области VIII. К тому же сопредельная с нею область III, представленная серией хорошо проявленных тектонических зон, характеризуется максимальным приращением вещества по сравнению со всеми другими областями первой группы. Очевидно, процессы привноса на этом участке были настолько значительны, что захватили прилегающую область VIII.

### РАЗМЕЩЕНИЕ РУДНОГО ВЕЩЕСТВА В ЛОКАЛИЗОВАННОМ ТЕМПЕРАТУРНОМ ПОЛЕ

Пространственный анализ осуществляется на основе качественного описания особенностей распределения рудных компонентов до и после нагревания. Построены вертикальные разрезы в изолиниях содержаний элементов, затем проведен статистический анализ всех материалов.

### Распределение свинца

Абсолютное содержание свинца до нагревания составляет от 4,6 до 160 г/т, после нагревания — от 2,0 до 200 г/т. Под влиянием неоднородного нагревания произошла перегруппировка в концентрации свинца (рис. 21).

В исходном блоке наблюдается довольно сложная картина распределения Pb. В левой части блока вырисовывается выдержанная зона пониженных значений содержаний Pb, тяготеющая к тектоническому элементу I. В областях нагревателей H<sub>2</sub>, H<sub>3</sub> и H<sub>4</sub> наблюдаются участки с повышенным содержанием элемента. Внутренняя структура поля распределения Pb складывается преобладающими вертикальными элементами.

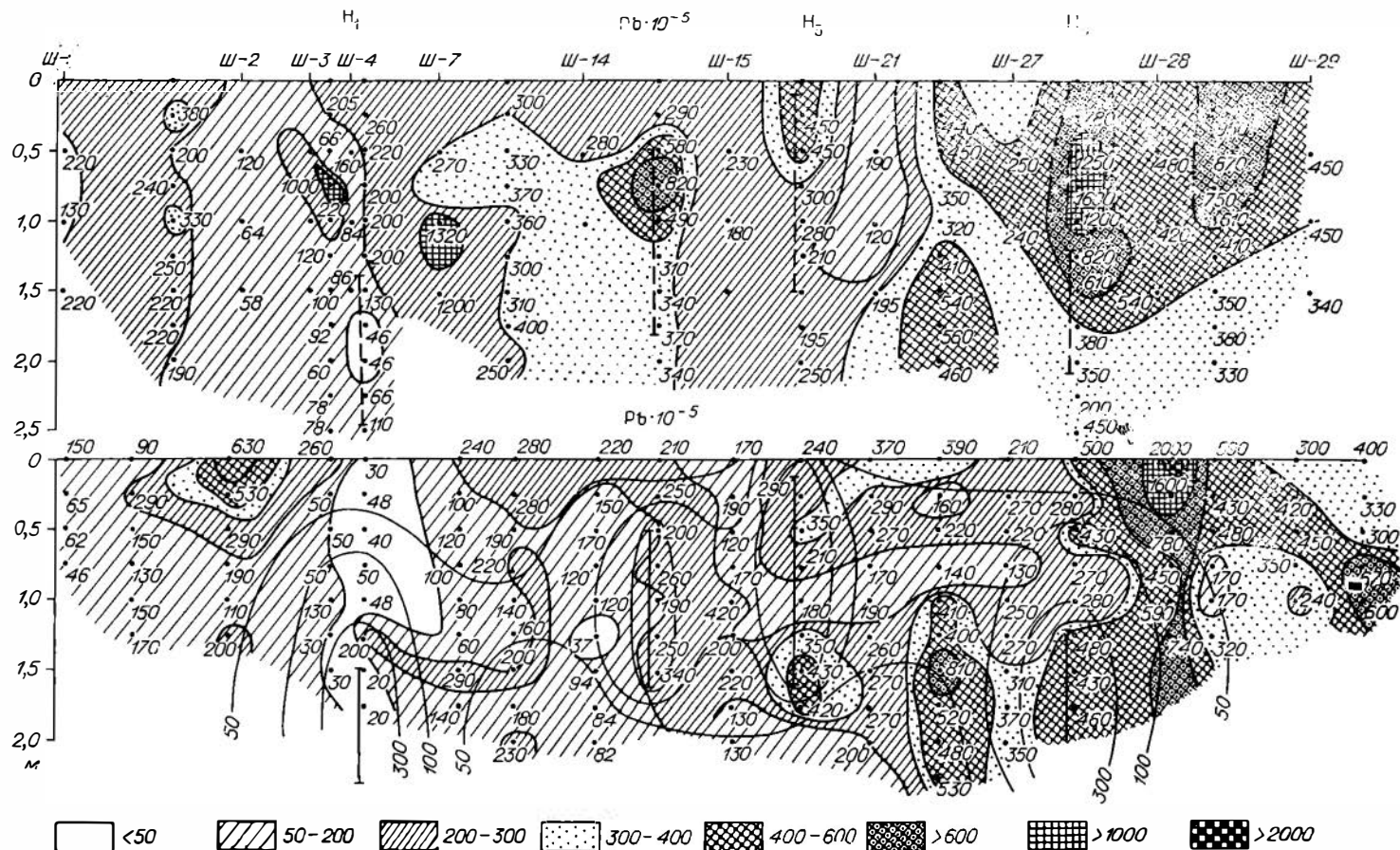


Рис. 21. Распределение Рb в блоке.

После нагревания произошла существенная перегруппировка элемента. В области нагревателя  $H_1$  образовалась зона пониженных содержаний Pb, захватывающая верхнюю часть нагревателя и прослеживаемая до поверхности (Pb — 5,0 г/т). В приповерхностной части разреза слева от  $H_1$  появилось пятно со значительным содержанием металла (до 63,0 г/т) на месте первичного малого содержания металла (до 12,0 г/т). Вертикальный участок со средними содержаниями элемента в исходном блоке после нагревания исчез. Здесь образовалась выдержанная область низких содержаний Pb. В окрестностях нагревателя  $H_2$  возникает область низких содержаний, которая прослеживается до нагревателя  $H_1$ . В исходных породах здесь было устойчивое поле средних содержаний Pb. Больше того, из этой области исчезло пятно с высокими содержаниями металла (до 82,0 г/т). Подобная же картина наблюдается и около нагревателя  $H_3$ . Правда, здесь в нижней части нагревателя формируется изометричное пятно повышенных содержаний Pb, а верхнее пятно, наблюдаемое в исходных породах, исчезает. Исчезает также и область низких содержаний металла, которая вырисовывалась в исходных породах справа от нагревателя  $H_3$ . Зато после нагревания между  $H_2$  и  $H_3$  формируется зона пониженных содержаний, прослеживаемая к нагревателю  $H_4$ .

Около нагревателя  $H_4$  наблюдается перегонка элемента в столбообразное тело справа от нагревателя (где встречаются максимальные концентрации Pb — до 200 г/т). Непосредственно над нагревателем формируется область средних содержаний Pb, хотя до нагрева здесь фиксировано столбообразное тело с максимальными содержаниями элемента (до 160 г/т).

Для Pb, таким образом, характерен вынос из зоны интенсивного нагревания и группировка его в отдельных зонах. Поля средних содержаний сокращаются, возрастают поля низких содержаний и происходит концентрация металла в немногих участках.

### Распределение кобальта

На плане опробования выделены изолинии средних содержаний Co (рис. 22). В результате нагревания экспериментального блока пород произошли существенные изменения в распределении Co в вертикальном разрезе (плоскость опробования).

В исходном блоке пород на общем фоне средних содержаний металла от 6,0 до 16,0 г/т выделяются две крупные области повышенных содержаний Co — области А и Б. В левой части блока преобладают более низкие содержания Co (не больше 16,0 г/т). Наиболее низкие содержания (6,0—10,0 г/т) приурочены к области нагревания 1.

Максимальные значения содержаний Co ( $>20,0$  г/т) образуют локальные участки, не связанные друг с другом. Они тяготеют лишь к определенным тектоническим зонам. Между областями А и Б наблюдается локальный минимум содержаний Co до 10,0 г/т. Отметим еще, что в левом верхнем углу блока на фоне низких содержаний Co вырисовывается локальный участок, приуроченный к тектоническому элементу X с содержанием Co 10,0—16,0 г/т.

Картина распределения Co в этой же плоскости резко меняется в блоке после нагревания (см. рис. 22). Качественный анализ приводимых построений позволяет подчеркнуть следующее.

1. В результате неоднородного нагревания блока пород усложняется внутреннее строение поля распределений Co, оно расчленяется на локальные участки обогащения и обеднения. Прослеживается связь распределения металла с локальными источниками нагревания. Появляются характерные столбообразные зоны концентрации и обеднения и т. д.

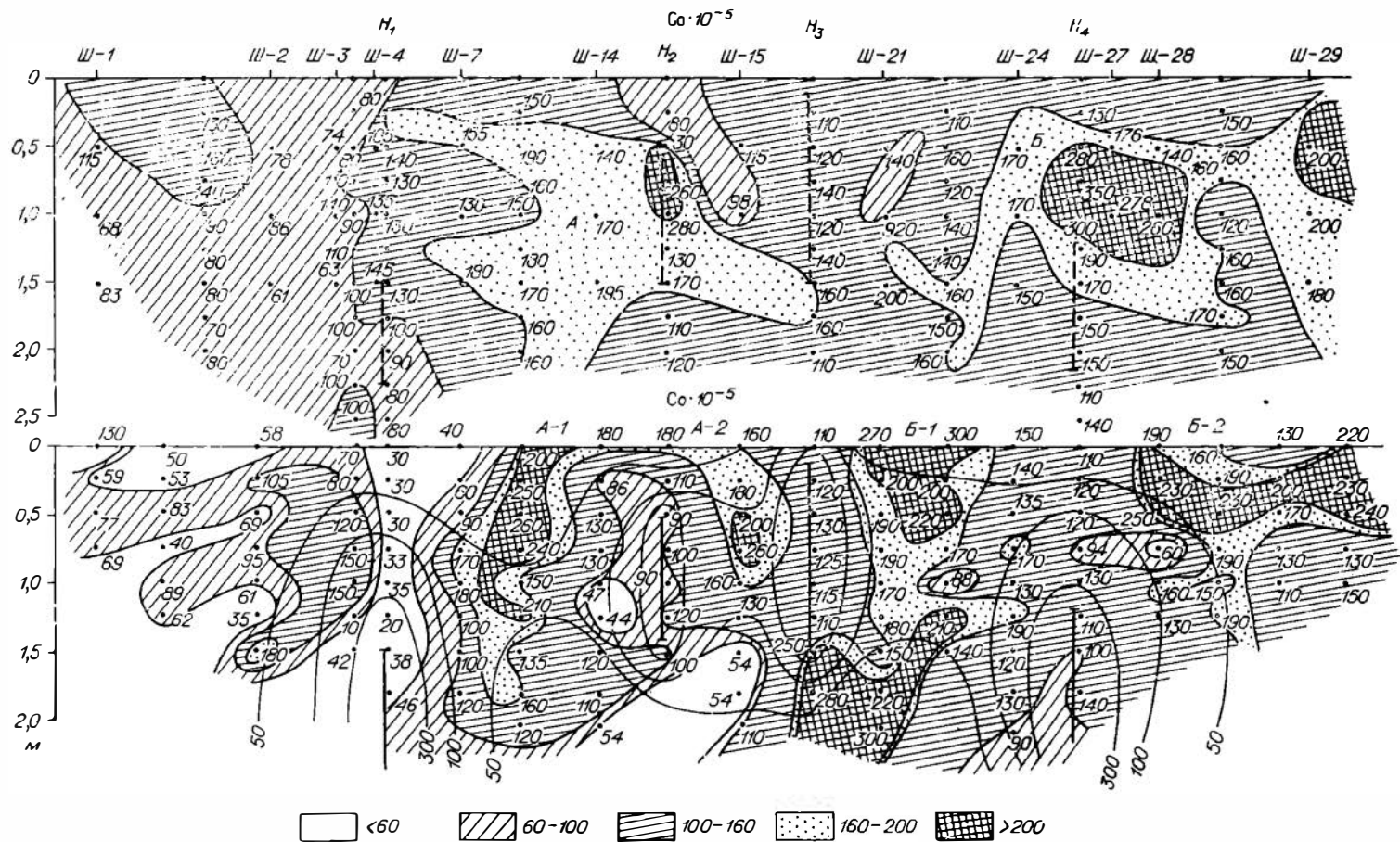


Рис. 22. Распределение  $S_s$  в блоке.

2. Область непосредственного нагревания характеризуется общим обеднением Co, для него характерен вынос из зон интенсивного нагревания. У каждого из четырех нагревателей ( $H_{1-4}$ ) образуются зоны с пониженными содержаниями элемента.

В левой части экспериментального блока (область нагревания  $H_1$ ) происходит существенный вынос элемента. Здесь появляется зона с самыми низкими значениями концентраций Co — меньше 6,0 г/т, чего в исходных породах не наблюдалось. Поле минимальных значений захватывает нижнюю часть разреза и подходит к нагревателю, от нагревателя узким трубообразным телом протягивается до поверхности. Слева вверху от нагревателя, на расстоянии 0,5—0,7 м формируется тело с содержанием Co от 10,0 до 15,0 г/т, которого на исходном разрезе нет. Конфигурация этого тела согласуется с трубообразным конусом выноса над нагревателем.

В сфере действия нагревателей  $H_1$  и  $H_2$ , находящихся в области исходной повышенной концентрации Co (область А), первоначальная область А расчленяется на две: А—1 и А—2 и элемент отмечен на расстоянии 50—60 см от нагревателей. При этом оба возникших участка концентрации Co имеют столбообразную вертикально вытянутую форму, повторяющую своими очертаниями поле температур. Около нагревателя  $H_2$  образуется локальное пятно с минимальными значениями содержания Co (до 6,0 г/т). Такая область минимальных значений подходит к нижним частям нагревателей, а еще ниже может быть соединена с подобной же областью нагревателя  $H_1$ . Напрашивается мысль, что возле нагревателей  $H_1$ ,  $H_2$  и  $H_3$  действовала общая система подтока и выноса элемента.

С областью Б первичной концентрации Co произошли аналогичные изменения — под воздействием нагревателя  $H_4$  этот блок расчленился на два новых блока, разделенных областью пониженных значений содержания Co. Около нагревателя  $H_4$  также сформировались зоны пониженных содержания Co ( $< 10,0$  г/т). Зоны повышенной концентрации Co отстоят от  $H_4$  на 0,4—0,6 м.

### Распределение никеля

В исходных породах экспериментального блока средние содержания Ni изменяются от 2,9 до 18,0 г/т. После нагревания этот диапазон расширяется от 1,3 до 36,0 г/т. Среднее содержание Ni в исходных породах всего блока составляет 3,1 г/т, а в породах после нагревания — 9,6 г/т (прил. IV, см. табл. 19). Породы блока обогащаются Ni за счет привноса из окружающей среды. Не менее существенны и качественные изменения в распределении Ni с нагреванием (рис. 23).

В исходном состоянии наблюдается общая тенденция образования участков со средними содержаниями (2,0—6,0 г/т) в тектонических зонах трещиноватости, обогащение и образование своеобразных ядер с повышенными содержаниями Ni в массивных породах.

В исходном экспериментальном блоке наблюдается своеобразная картина распределения Ni: в левой и правой частях блока преобладают вертикальные структуры распределения, а в средней части блока — изометричные и приближающиеся к горизонтальным (см. рис. 23).

Неоднородное нагревание блока вызвало заметную перегруппировку элемента вокруг очагов нагревания. В первой области нагревания (нагреватель  $H_1$ ) образовалась зона самых низких ( $< 2,0$  г/т) содержания Ni. Главная часть элемента отогналась от нагревателя вправо, и на расстоянии 0,8—1,0 м образовалось своеобразное вертикальное тело с повышенным (до 36,0 г/т) содержанием металла. Отгонка Ni

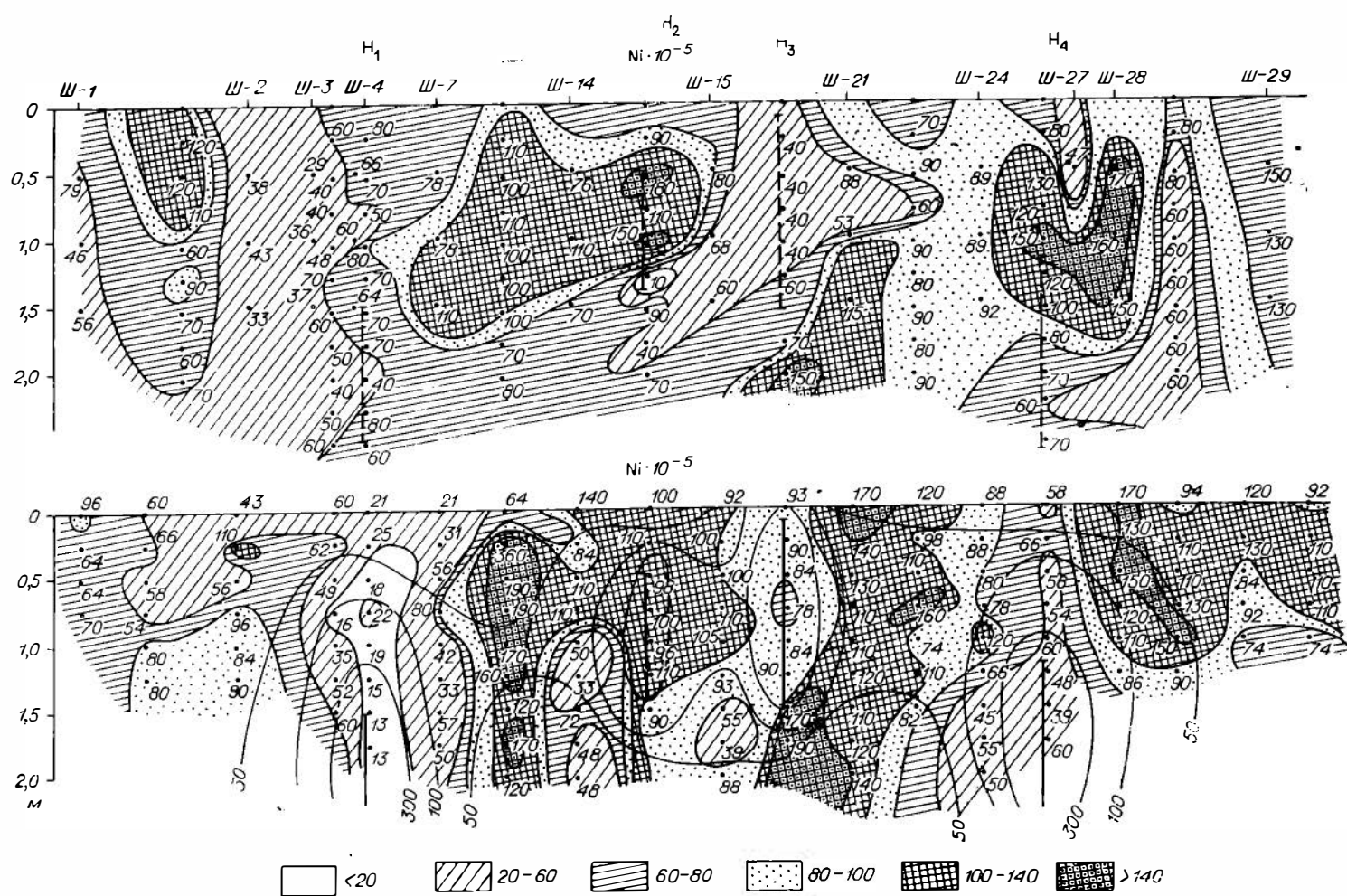


Рис. 23. Распределение Ni в блоке.



из зоны нагревания иотчливо выражена и в области нагревателя Н<sub>4</sub>. Здесь также на месте первоначально обогащенных Ni пород (до 15,0 г/т) образуется выдержанная вертикальная зона, характеризующаяся средним содержанием металла (4,0—6,0 г/т). Высвобожденный металл отгоняется вправо и влево от нагревателя.

Принципиально другая картина перегруппировки элемента в областях действия нагревателей Н<sub>2</sub> и Н<sub>3</sub>. Для этих областей характерно обогащение пород Ni в зонах нагревания по сравнению с исходными породами этих же участков. Это обусловлено, видимо, тем, что расположенные выше нагреватели Н<sub>2</sub> и Н<sub>3</sub> подвергаются воздействию нагревателей Н<sub>1</sub> и Н<sub>4</sub>. Поэтому здесь повышается общее содержание металла во всей области. На этом фоне, однако, проявляется и основная тенденция поведения в зонах нагрева: отгонка его из зоны интенсивного нагревания. Вследствие этого около нагревателя Н<sub>3</sub> справа формируются участки с повышенным содержанием металла, которого не было в исходных породах. Под воздействием же нагревателя Н<sub>2</sub> существовавшие в исходном блоке участки повышения содержания элемента в исходных породах исчезают.

Внутренняя структура полей распределения Ni после нагревания определяется вертикальными структурными элементами.

### Распределение цинка

Среднее содержание Zn по всему блоку до нагревания составляло 45 г/т, а после нагревания — 36 г/т (прил. IV, рис. 24), после нагревания вынесена почти одна четверть металла.

Сравнивая особенности распределения Zn на плане вертикального разреза, можно видеть, что в результате нагревания произошло некоторое его перераспределение, а в областях нагрева I и III — некоторый вынос металла. Так, около нагревателя Н<sub>1</sub> расширяется зона низкого содержания металла, в ней появляются разрозненные участки с аномально низким содержанием Zn (<20 г/т). Слева от Н<sub>1</sub> на некотором удалении образуется более выдержанная зона минимального содержания металла.

Участки пород с повышенным содержанием Zn, расположенные в исходном блоке на этом месте, исчезли. Вынос элемента наблюдается и около нагревателя Н<sub>3</sub>. Здесь, кроме того, видно, что после нагревания появляются вертикальные структурные концентрационные элементы. Поле пониженных содержаний элемента (20—40 г/т) прослеживается и к нагревателю Н<sub>2</sub>, оно замещает поля с более высоким (40—60 г/т) содержанием Zn в исходных породах.

Не составляет исключения и характер воздействия на породы, окружающие нагреватель Н<sub>4</sub>, слева от которого (в 0,5 м) формируется верхняя зона пониженных и аномально низких содержаний металла. Справа от Н<sub>4</sub> на расстоянии 1,0—1,2 м также формируется подобная зона. Обе зоны в исходных породах не прослежены.

### Распределение меди

Среднее содержание Cu, по статистическим данным, для всего блока пород до нагревания составляло 51 г/т, после нагревания — 45 г/т. С нагреванием происходит общий вынос металла из блока в количестве до 10% от исходного содержания.

Распределение Cu в исходном блоке (рис. 25) характеризуется преобладанием хорошо выраженных вертикальных структурных концентрационных элементов, особенно хорошо проявленных около нагревателей Н<sub>1</sub>, Н<sub>4</sub> и отчасти около Н<sub>2</sub> и Н<sub>3</sub>. В исходных породах развиты

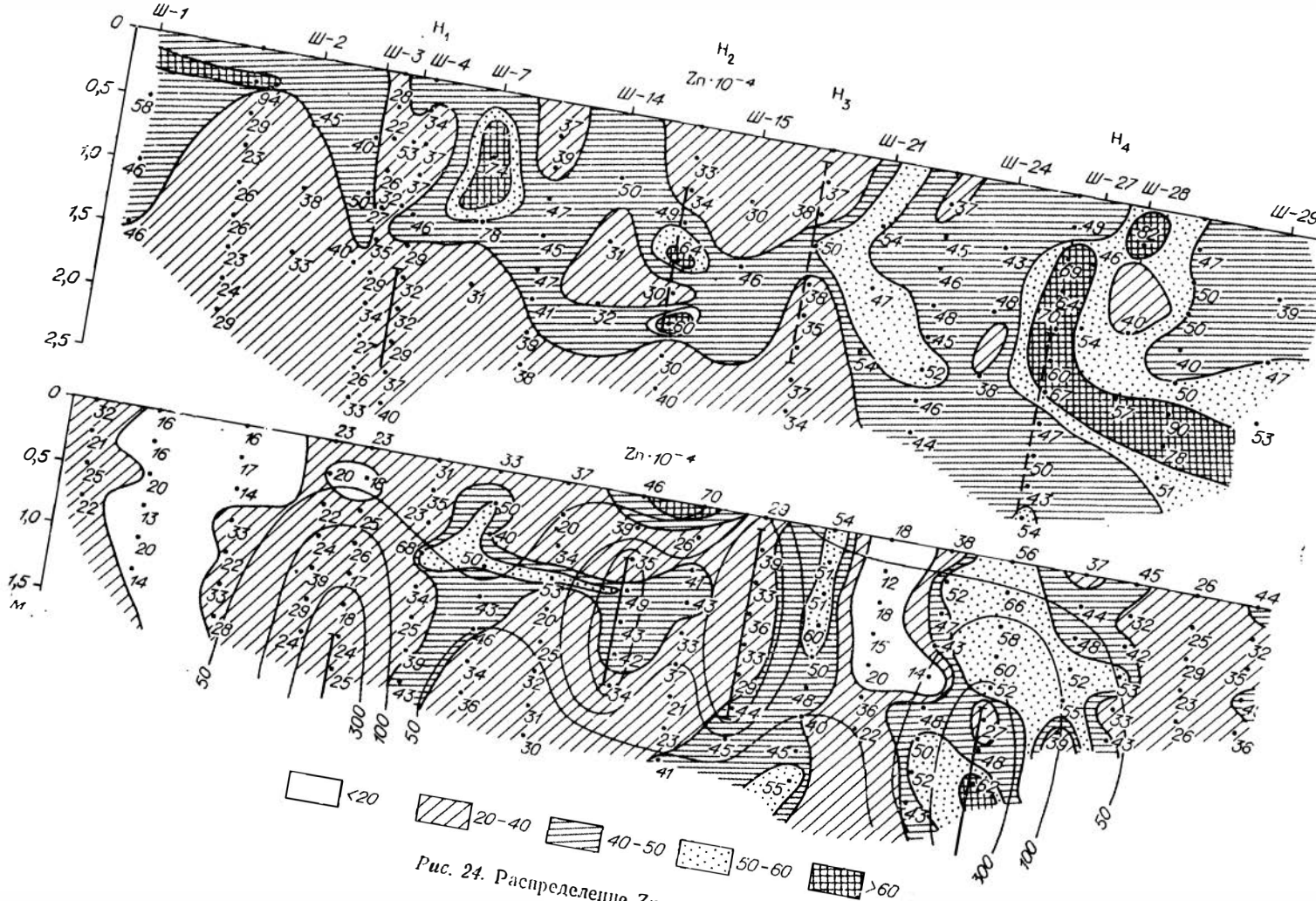


Рис. 24. Распределение Zn в блоке

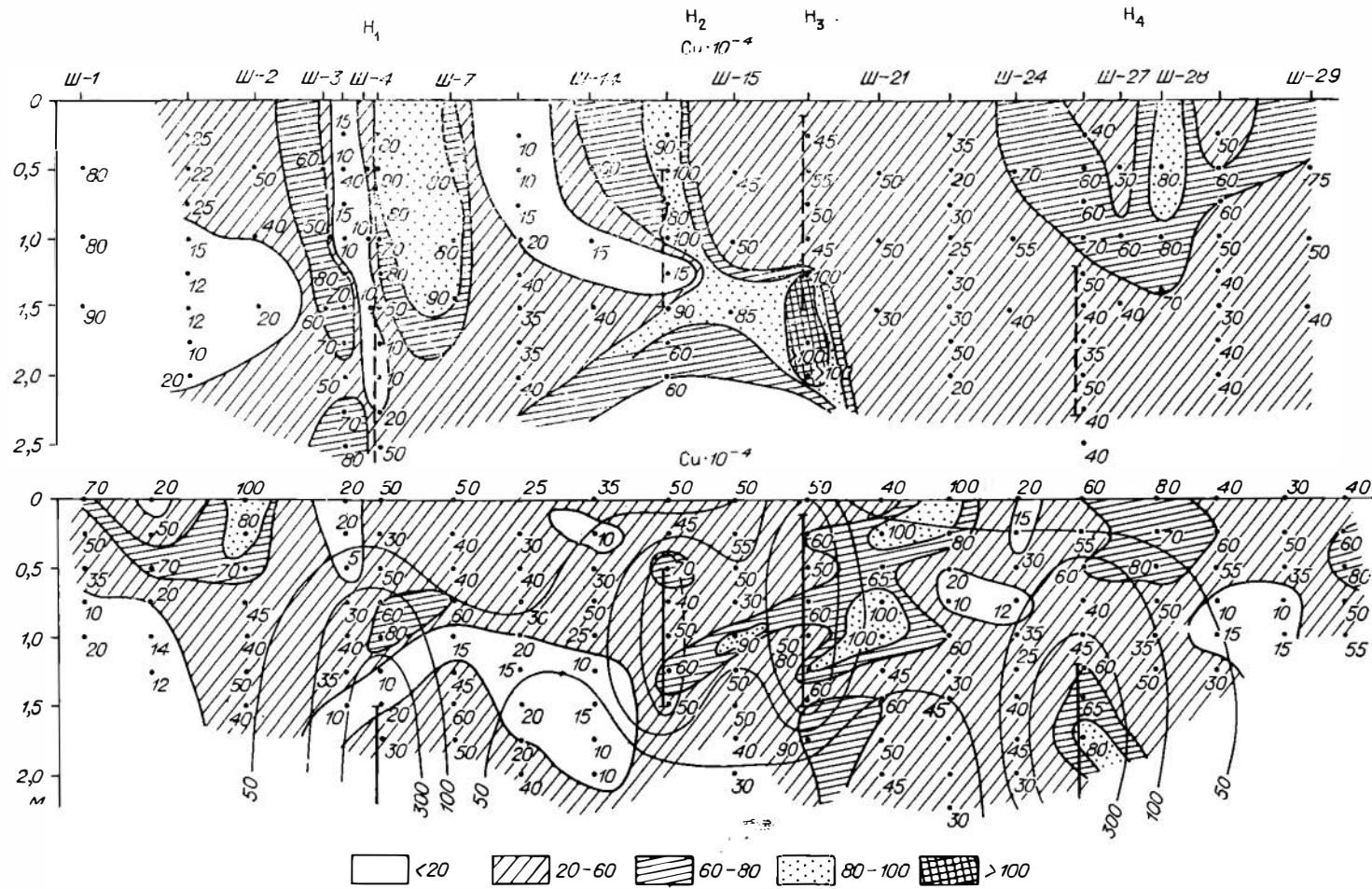


Рис. 25. Распределение Си в блоке.

участки с минимальными количествами Си ( $<20$  г/т) слева от нагревателя  $H_1$ , над нагревателем  $H_1$  и в средней зоне между нагревателями  $H_1$  и  $H_2$ . Максимальное содержание Си в исходных породах превышает 100 г/т (0,01%). Отметим еще, что около нагревателя  $H_3$  развито единое поле пород со средним содержанием металла (20—60 г/т). Около нагревателя  $H_3$  только в его нижней части проходит зона повышенного содержания, уходящая влево, в область нагревателя  $H_2$ . Над нагревателем  $H_4$  отмечается развитие крупного участка пород с высоким и повышенным содержанием элемента.

Внутренняя структура поля распределения Си в исходных породах экспериментального блока четко дифференцирована с преобладанием вертикальных структурных элементов, согласующихся в общих чертах с тектоникой блока.

Нагревание блока вызвало существенную перестройку геохимических полей Си как в количественном, так и в качественном отношении. Первоначальная структура поля с вертикальными составляющими исчезла. Произошел распад первоначально крупных ядер концентрации металла на мелкие блоки и пятна. Преобладающими структурными элементами геохимического поля Си стали горизонтальные и наклонные составляющие. В области действия нагревателя  $H_3$  сформировано новое ядро концентрации металла. Около нагревателя  $H_1$  образовалось большее поле пород с пониженными и минимальными содержаниями Си. Для всех нагревателей (кроме  $H_4$ ) характерна отгонка металла из зоны интенсивного нагревания. Лишь около нагревателя  $H_4$  образовался локальный участок с повышенным содержанием металла.

### Распределение молибдена

Рассматривая вертикальный разрез экспериментального блока, можно проследить, что в исходном блоке сиенито-диоритов Мо распределен неравномерно (рис. 26). В частности, выделяются участки с повышенным содержанием (до 4,0—5,0 г/т), разделенные областями очень низких (до 1,0—1,5 г/т) содержаниями металла. Особенности распределения Мо в исходном блоке согласуются с его тектоническими и вещественными чертами.

В результате нагревания произошла существенная перегруппировка Мо, сопровождающаяся возрастанием концентраций металла в одних участках, появлением областей пониженных содержаний в других и т. п. Наиболее характерно стягивание металла к очагам нагревания. Рассмотрим это на примерах всех нагревателей.

Около нагревателя  $H_1$  на месте вытянутой зоны пониженных содержаний, вырисовывающей тектоническую зону I (трещиноватости), в исходных породах после нагревания формируется столбообразное тело с содержанием металла до 13,0 г/т.

На удалении от нагревателя  $H_1$  слева формируется участок пониженных содержаний Мо. В области нагревателей  $H_2$  и  $H_3$  также образуется вертикальный столбообразный участок с повышенными содержаниями элемента.

В исходных породах между нагревателями  $H_3$  и  $H_4$  отмечалась узкая вертикальная область с содержанием  $Mo > 4,0$  г/т. После нагревания на этом месте наблюдается вертикальная зона пониженного содержания металла. Наоборот, если в зоне действия нагревателя  $H_4$  в исходных породах наблюдалась область устойчивых пониженных содержаний Мо, то после нагревания в этой зоне количество Мо возрастает значительно. В правой части экспериментального блока была прослежена (скв. 9) зона низких содержаний Мо. После нагревания эта зона не отмечена.

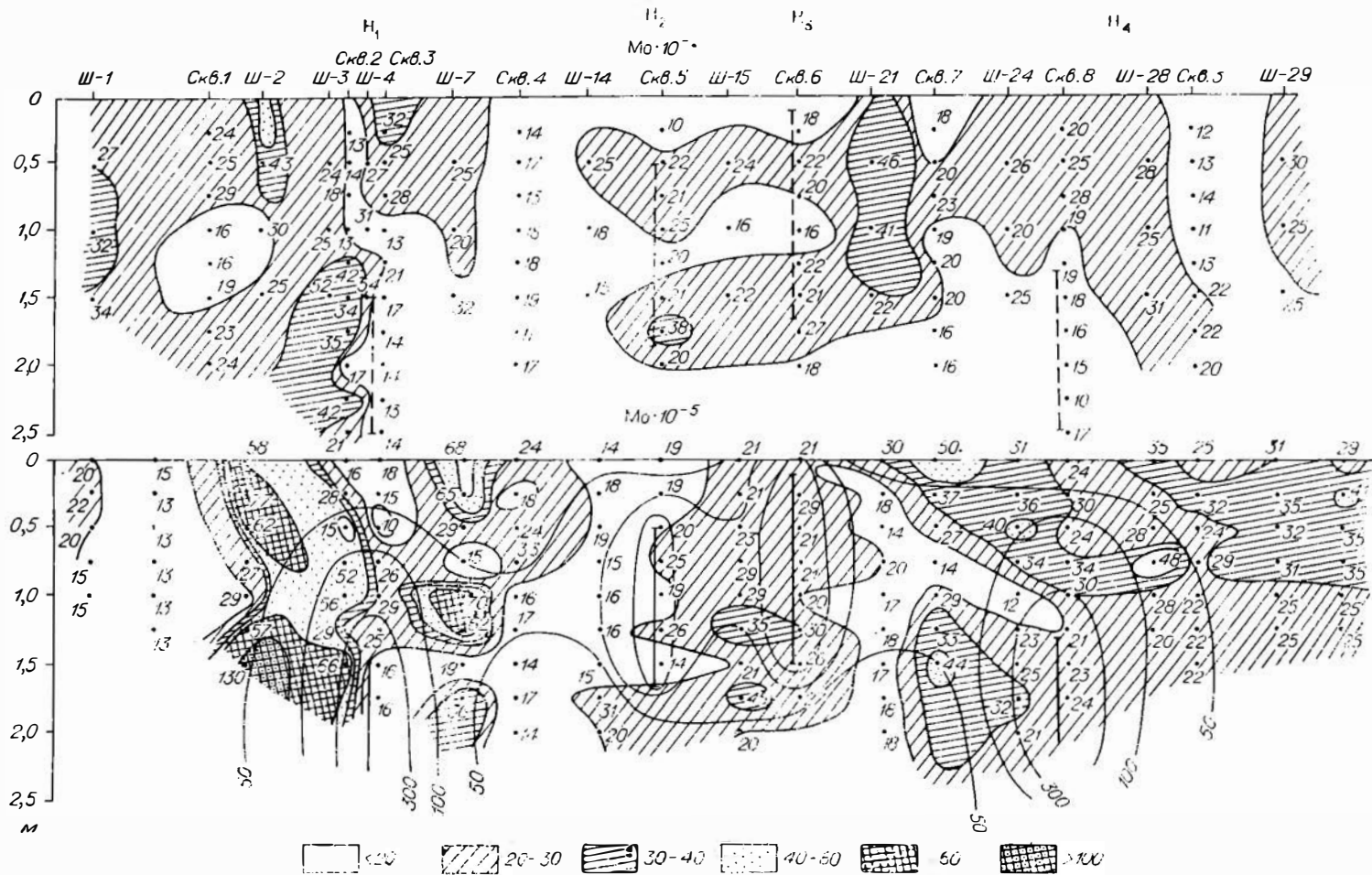


Рис. 26. Распределение Mo в блоке.

**Статистические особенности взаимосвязи  
тепловых и вещественных полей**

Первым шагом в статистическом изучении особенностей влияния неоднородного нагрева на перераспределение рассеянных элементов были расчет и сравнение статистических параметров по зонам нагревания (табл. 27). При сравнении средних содержаний элементов в одних и тех же зонах до и после нагревания отмечено:

Таблица 27

**Приращения рудных элементов в результате нагревания (г/т)**

Зоны нагрева, °С	Zn		Pb		Co		Ni		Cu		Mo		Сумма
	среднее	приращение	среднее	приращение	среднее	приращение	среднее	приращение	среднее	приращение	среднее	приращение	
<50	46,3 31,9	-14,4	32,4 33,5	+3,1	13,0 13,5	+0,5	8,7 9,3	+0,6	56,6 43,3	-12,7	2,4 2,8	+0,4	-22,5
50—100	43,7 38,6	-5,1	38,1 27,4	-10,7	16,5 15,5	-1,0	8,1 10,6	+2,5	45,6 45,7	+0,1	3,3 3,0	-0,3	-14,5
100—300	45,3 38,9	-6,4	29,9 38,2	+8,3	13,5 14,4	+0,9	7,3 8,6	+1,3	49,6 43,4	-6,2	2,5 2,8	+0,3	-1,8
>300	41,2 35,0	-6,2	28,8 31,6	+2,8	14,2 14,0	-0,2	7,2 8,7	+2,5	47,0 46,3	-0,7	2,2 2,9	+0,5	-2,3
Сумма		-32,1		+3,5		+0,2		+5,9		-19,5		+0,9	-14,1

Примечание. В числителе значения средних до нагревания, в знаменателе — после.

1. В результате нагревания происходит общий вынос элементов во всех зонах нагревания. При этом в зонах нагрева <50°С и 50—100°С этот суммарный вынос существен (до 37,0 г/т), а в зонах интенсивного нагрева — не превышает 2,3 г/т.

2. Особенно интенсивно выносятся цинк (-32,1 г/т), медь (-19,5 г/т). Остальные элементы привносятся в одни зоны нагревания и «вымываются» из других.

Статистические материалы по зонам нагрева ранее рассматривались для всего блока вместе, что привело к некоторому усреднению конечных результатов. Чтобы избежать этого, нами просчитаны зоны

Таблица 28

**Приращения рудных элементов сравнительно с генеральной средней после нагревания (г/т)**

Зона нагрева, °С	Zn	Pb	Co	Ni	Cu	Mo	Сумма
< 50	-3,8	+2,6	-1,0	-0,3	-1,7	0,0	-4,2
50—100	+2,9	-5,5	+1,0	-1,0	+0,7	+0,2	+0,3
100—300	+3,2	+5,3	-0,1	-1,0	-1,6	0	+5,8
> 300	-0,7	-1,3	-0,5	-0,9	+1,3	+0,1	-2,0
Сумма . .	+1,6	+1,1	-0,6	-1,2	-1,3	+0,3	

## Приращения рудных элементов сравнительно с генеральными суммами до нагревания (г/т)

Зона нагрева, °С	Zn	Pb	Co	Ni	Cu	Mo	Сумма
<50	-12,7	+2,0	-0,9	+1,2	-6,5	-0,2	-17,1
50—100	-16,0	-6,1	+1,1	+2,5	-5,1	0	-23,6
100—300	-15,7	+4,7	0	+0,5	-7,4	-0,2	-18,1
>300	-9,6	-1,9	-0,4	+0,6	-4,5	-0,1	-15,9
С у м м а . .	-54,0	-1,3	-0,2	+4,8	-23,5	-0,5	

нагревания всех четырех нагревателей. Ниже приводится их анализ. В качестве средних сравнений здесь взяты генеральные средние до и после опыта для зон и областей нагревания.

В табл. 28, 29 и прил. XIV приведены средние содержания анализируемых металлов по областям (I—IV) и по зонам нагрева. Для каждой зоны будущего нагревания здесь подсчитаны суммарные содержания рудных, количество которых может изменяться в отдельных частях экспериментального блока от 98,4 до 211,4 г/т.

Суммы рудных меняются после нагревания от 86,8 до 201,6 г/т (табл. 30). Здесь введена величина, характеризующая приращение количества рудных по зонам в каждой области нагревания. Положительные и отрицательные приращения могут колебаться от -60,7 до +101,8 г/т.

При рассмотрении отдельных областей нагревания выяснилось, что большинство их (кроме III) характеризуется суммарным выносом рудных, например, I—68,5; II—79,2, III—149,4 г/т. Общий вынос

Т а б л и ц а 30

## Приращение количества рудных элементов (г/т) после нагревания

Область нагревания	Зона нагрева, С	Cu	Mo	Zn	Co	Ni	Pb	Сумма	
								по зонам	по областям
I	<50	-0,8	+0,6	-17,9	-0,7	+0,9	+1,9	-16,0	-67,9
	50—100	-12,5	+0,7	+0,9	-0,5	-1,0	-28,3	-40,7	
	100—300	-2,8	+0,1	-9,8	+7,9	+3,8	0	+0,5	
	>300	-5,6	+0,7	-7,6	+1,5	-0,6	0	-11,6	
II	<50	+1,4	+0,6	-5,4	+2,8	+4,4	-3,0	+0,8	-78,6
	50—100	-18,5	-0,3	-15,0	-1,6	+0,9	+13,9	-20,6	
	100—300	-53,5	+2,2	+6,0	+3,1	+3,5	+4,9	-33,8	
	>300	-9,2	+0,3	-8,5	-8,6	+1,5	-0,5	-25,0	
III	<50	+3,3	-1,9	-3,4	+6,4	+3,0	+2,4	+9,8	+204,7
	50—100	+31,4	+0,2	+19,1	+8,5	+4,2	+9,0	+72,4	
	100—300	+38,3	+0,7	+13,7	+21,3	+4,5	+23,3	+101,8	
	>300	+0,8	+0,7	-1,3	+8,1	+6,1	+6,3	+20,7	
IV	<50	-3,8	+1,0	-17,5	+0,5	+1,6	+2,5	-15,7	-149,4
	50—100	-39,4	+1,2	-7,6	-5,3	+3,6	-13,2	-60,7	
	100—300	-12,3	+0,5	-4,8	-3,8	-3,4	-1,2	-25,0	
	>300	-13,9	+1,2	-9,3	-1,5	+0,6	-15,1	-48,0	

Приращения рудных элементов по зонам и областям нагревания (г/т)

Область нагрева	Зона нагревания	Cu	Mo	Zn	Co	Ni	Pb	Сумма
I	Все зоны нагревания	-21,7	+2,1	-34,4	+8,2	+3,1	-26,4	-68,5
II		-79,8	+2,2	-22,9	-4,3	+10,3	+15,3	-79,2
III		+73,8	-0,3	+28,1	+44,3	+17,8	+41,0	-204,7
IV		-69,4	+3,9	-39,2	-10,1	+2,4	-27,0	-149,4
Все области нагрева	<50	+0,1	+0,3	-44,2	+9,0	+9,9	+3,8	-19,1
	50—100	-39,4	+4,3	-2,6	+1,1	+7,7	-18,6	-47,5
	100—300	-30,3	+3,5	+5,1	+28,5	+8,4	+27,0	+42,2
	>300	-27,9	+2,9	-26,7	-0,5	+7,6	-9,3	-53,9

в результате нагрева составил 287,1 г/т. Привнос рудных элементов в III области нагрева равен 204,7 г/т. Дефект рудной массы равен 82,4 г/т.

Отдельные элементы на общем фоне выноса вещества из нагревательного блока ведут себя по-разному. Устойчивый вынос во всех областях нагрева характерен для Zn и Cu (кроме области III), привнос — для Ni и Mo. Co и Pb занимают промежуточное положение. Так, Co привносится в областях I и III, а выносятся во II и IV. Pb выносятся в областях I и IV, а привносится во II и III.

Не менее разнородна картина перемещений отдельных рудных элементов по четырем зонам нагревания (1-я — <50°C, 2-я — 50—100, 3-я — 100—300 и 4-я >300°C). Судя по изменению суммарных содержаний рудных (табл. 31, 32, 33), зоны 1, 2, 4 характеризуются выносом элементов (-19,1; -47,5 и 53,9 г/т соответственно) и только зона 3 характеризуется суммарным привносом рудных (42,2 г/т). При

Таблица 32

Средние содержания рудных элементов в исходных породах блока в различных зонах будущего нагрева (г/т)

Область нагрева	Зона нагревания, °C	Cu	Mo	Zn	Co	Ni	Pb	Сумма рудных
I	<50	49,0	2,6	42,5	9,5	5,6	17,6	126,8
	50—100	46,8	2,8	35,0	12,1	5,9	40,8	143,4
	100—300	45,5	3,1	38,4	11,2	4,7	14,3	117,2
	>300	40,0	2,6	32,5	10,1	5,9	7,3	98,4
II	<50	23,0	1,7	43,6	15,8	9,9	30,8	124,8
	50—100	60,0	2,5	50,0	14,0	7,6	28,0	162,1
	100—300	90,0	1,0	33,0	7,8	8,6	29,0	169,4
	>300	61,2	2,2	45,7	19,6	8,8	39,2	176,7
III	<50	44,2	4,3	49,1	13,9	8,4	19,1	139,0
	50—100	45,0	1,7	30,0	9,8	6,8	18,0	111,3
	100—300	40,0	2,3	27,0	8,5	5,0	17,0	99,8
	>300	66,1	2,3	39,6	12,2	4,3	33,8	158,3
IV	<50	41,1	1,9	52,5	14,3	8,5	48,7	167,0
	50—100	77,5	2,1	51,2	20,7	17,9	42,0	211,4
	100—300	51,6	2,3	53,5	19,3	10,4	62,1	199,2
	>300	43,0	1,6	56,0	15,4	8,5	47,2	171,7



**Распределение Рудных элементов в различных зонах и областях  
после нагревания(г/т)**

Область нагрева	Зона нагрева- ния, °С	Си	Мо	Zn	Со	Ni	Pb	Сумма рудных	Прираще- ния после нагревания
I	<50	48,2	3,2	24,6	8,8	6,5	19,5	110,8	-16,0
	50—100	34,3	3,5	35,9	11,6	4,9	12,5	102,7	-40,7
	100—300	44,0	3,2	28,6	19,1	8,5	14,3	117,7	+0,5
	>300	34,4	3,3	24,9	11,6	5,3	7,3	86,8	-11,6
II	<50	24,4	2,3	38,2	18,6	14,3	27,8	125,8	+0,8
	50—100	41,5	2,2	35,0	12,4	8,5	41,9	141,5	-20,6
	100—300	36,5	3,2	39,0	10,9	12,1	33,9	135,6	-33,8
	>300	52,0	2,5	37,2	11,0	10,3	38,7	151,7	-25,0
III	<50	47,5	2,4	45,7	20,3	11,4	21,5	148,8	+9,8
	50—100	76,4	1,9	49,1	18,3	11,0	27,0	183,7	+72,4
	100—300	78,3	3,0	40,7	29,8	9,5	40,3	201,6	+101,8
	>300	66,9	3,0	38,3	20,3	10,4	40,1	179,0	+20,7
IV	<50	37,3	2,9	35,0	14,8	10,1	51,2	151,3	-15,7
	50—100	38,1	3,3	43,6	15,4	21,5	28,8	150,7	-60,7
	100—300	39,3	2,8	48,7	15,5	7,0	60,9	174,2	-25,0
	>300	29,1	2,8	36,7	13,9	9,1	32,1	123,7	-48,0

этом у отдельных элементов наблюдаются свои особенности перераспределения по зонам нагревания.

Си выносятся из всех зон (если не считать зону I, где наблюдается незначительное ее приращение (0,1 г/т)). Вынос достигает существенных величин (27,9—39,4 г/т), что составляет больше половины исходных содержаний. Причем максимально Си выносятся из зоны 2 (39,4 г/т), и с усилением нагрева вынос уменьшается.

Мо привносится на всем диапазоне нагревания и достигает величины 4,3 г/т, максимум лежит в зоне 50—100° и уменьшается в последующих зонах до 2,9 г/т.

Zn преимущественно выносятся из всех зон нагревания (в зоне 1—44,2, 2—2,6, 2—26,7 г/т). Исключение составляет зона нагрева 100—300°C, где содержание металла возрастает на 5,1 г/т.

Со преимущественно привносится (за исключением зоны 4, где  $\Delta C_{со} = 0,5$  г/т). Максимум приращения Со находится в зоне 100—300° (+28,5 г/т). Количество его во всех зонах нагрева монотонно возрастает на величины 7,6—9,6 г/т.

Pb ведет себя непостоянно: его количество возрастает в зоне 1 (+3,8 г/т) и 3 (+27,0 г/т) и уменьшается в зонах 2 (-18,6 г/т) и 4 (-9,3 г/т).

#### Глава 4

### ОБЩИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ В НЕОДНОРОДНЫХ ТЕПЛОВЫХ ПОЛЯХ

Рассмотрим в обобщенном виде главные особенности термоградиентного перераспределения в неоднородных тепловых полях рассеянных в породах рудных элементов.

В экспериментальном блоке сформировалось равновесное термоградиентное поле, охватившее большую часть пород. Мощность зоны нагрева свыше  $100^{\circ}\text{C}$  составила 2 м; нагрева от  $50$  до  $100^{\circ}\text{C}$  — 4 м и так далее. Влияние нагрева прослежено до глубины 9 м.

Величины тепловых потоков изменялись от 0,01 до  $0,5 \text{ кал/см}^2 \cdot \text{с} \cdot ^{\circ}\text{C}$ . При нагревании пород до  $70^{\circ}\text{C}$  тепловой поток резко возрастает, затем остается без изменения.

По степени воздействия температурного поля на средние содержания рудных выделяются три группы активности (или подвижности) элементов: слабая — Zn, средняя — Mo, Ni, Co, сильная — Cu, Pb.

Отдельные зоны нагревания содержат определенные ассоциации элементов: при нагреве  $<30^{\circ}$  — Zn, Ni, Cu, Co;  $30-50^{\circ}$  — Zn, Co;  $50-100^{\circ}$  — Co;  $>100^{\circ}$  — Mo, Pb.

Пространственное распределение рассеянных элементов после нагревания претерпевает заметное изменение. При этом выделяются участки обогащения и обеднения, не совпадающие для отдельных элементов. В наименее прогретых участках увеличивается содержание Zn, Ni, Co. Cu; приращение их содержаний по сравнению с исходными составили (%) для Cu — (+50), Co — (+30), Ni — (+30) и т. д. В наиболее прогретых частях блока концентрируются Mo (до +50%) и Pb.

Зона максимального прогрева (нагрев  $200-700^{\circ}\text{C}$ ) была опробована через 5 см. Здесь наблюдается противоположная зональность отложения элементов. Cu, Zn, Ni, Co максимально концентрируются в непосредственной близости от нагревателя. Mo и Pb несколько отходят от нагревателя.

Отдельные рудные элементы характеризуются своими особенностями поведения в неоднородном тепловом поле.

**Молибден.** Исходное содержание в блоке колеблется от  $1 \cdot 10^{-4}$  до  $3 \cdot 10^{-4}$  (см. рис. 12). При этом минимальные его содержания тяготеют к приповерхностной относительно «сухой» зоне (до глубины 1—1,5 м). Уровень максимального содержания совпадает с границей 10%-ной влажности. Далее содержание Mo практически не изменяется, оставаясь на уровне  $2 \cdot 10^{-4}\%$ .

После нагревания распределение Mo значительно изменяется (см. рис. 17). В зоне нагрева по отдельным пробам количество Mo повышается до  $6-9 \cdot 10^{-4}\%$ , а в близповерхностной зоне и в отдельных участках на глубине сокращается до  $5 \cdot 10^{-5}\%$ .

Наряду с увеличением дисперсии содержаний в зоне прогрева формируются участки, обогащенные Mo. Последние тяготеют преимущественно к верхней части очага нагрева, образуя над ним своеобразную «шапку». При этом максимально Mo концентрируется в непосредственной близости от очага в виде небольших участков, разобщенных зонами относительно пониженного ( $2-3 \cdot 10^{-4}\%$ ) содержания.

По своему положению в вертикальном разрезе область концентрации Mo над очагом нагрева отчасти совпадает с зоной его исходных максимальных содержаний ( $3 \cdot 10^{-4}\%$ ), но заметно отличается от последней по морфологии (явное тяготение к очагу нагрева) и по наличию в ней участков повышенных содержаний (до  $9 \cdot 10^{-4}\%$ ), вообще нехарактерных для исходных пород.

Область повышенных концентраций Mo над очагом нагрева сверху и снизу оконтуривается зонами пониженных содержаний. При этом если содержание Mo в верхней зоне близко к его исходным содержаниям (минимальное зафиксировано в узкой ленте пород), то в нижней оно постоянно ниже исходных концентраций, где отмечены отдельные участки с наиболее низким для разреза содержанием. Нижняя зона по-

ниженных концентраций являлась, очевидно, основной зоной выноса Мо, локализующегося над очагом нагрева. В меньшей степени Мо извлекался из верхней зоны.

Наконец, в самой нижней части разреза (исключая область, непосредственно примыкающую к нагревателям) содержание Мо в основном аналогично исходному. Эта зона в разрезе имеет форму чаши с углублением в области нагревателей. Элементы чашеобразной формы намечаются и для ранее рассмотренных зон.

**Медь.** В исходных породах (см. рис. 12) содержание Си относительно равномерно ( $4-5,5 \cdot 10^{-3}\%$ ), и только в единичных пробах (без фиксируемой закономерности) оно снижается до  $1,8 \cdot 10^{-3}\%$ .

Нагревание привело к значительному перераспределению элемента в вертикальном разрезе (см. рис. 17). В области интенсивного нагрева отчетливо выделилась зона заметно пониженных ( $4 \cdot 10^{-3} - 1 \cdot 10^{-4}\%$ ) содержаний со структурой изоконцентрат, подчеркивающей структуру теплового поля (см. рис. 17). За пределами этой зоны, в области с концентрацией Си, близкой к исходной ( $4-6 \cdot 10^{-3}\%$ ), выделяются отдельные участки, где она увеличивается до  $9 \cdot 10^{-3}\%$ . В приповерхностной части блока образовался выдержанный горизонт с максимальной концентрацией Си (очевидно, сказалось влияние испарения влаги в приповерхностной зоне).

**Цинк.** После нагревания (см. рис. 17) Zn накапливается в верхней части разреза ( $4-5,5 \cdot 10^{-3}\%$ ), где фиксируются и небольшие участки с содержанием Zn до  $1 \cdot 10^{-2}\%$ . Внизу блока содержание Zn равно  $1 \cdot 10^{-2} - 5,5 \cdot 10^{-3}\%$  или даже ниже исходных.

Непосредственно в районе очагов нагрева содержание Zn также несколько повышено (здесь даже встречаются отдельные участки с высокой концентрацией), но эти области повышенных концентраций сдвинуты в зоны относительно слабого прогрева. Непосредственно над нагревателем, (более близким к поверхности) образовался своеобразный «столб» пониженных содержаний, пространственно совпадающий с зоной выноса паро-водяной смеси.

В целом у Zn, как и Си, намечаются элементы чашеобразной формы распределения, согласующиеся со структурой теплового поля.

**Свинец.** В исходных породах содержание Pb изменяется в пределах от  $1 \cdot 10^{-3}$  до  $3 \cdot 10^{-3}$  без каких-либо закономерностей. Некоторое обеднение было характерно для приповерхностной зоны.

В результате нагревания резких изменений в распределении Pb не обнаружено (очевидно, из-за нахождения элемента в форме устойчивых сульфатных соединений). Характер перераспределения Pb (см. рис. 17) в неоднородном тепловом поле имеет много общего с распределением Мо. Участки с аномально повышенными содержаниями Pb (до  $4,5 \cdot 10^{-3}\%$ ) здесь также тяготеют к средней части разреза, сосредоточиваясь в основном над нагревателями. Их можно объединить в своеобразную «обогащенную» полосу, опускающуюся в очаг нагревания.

**Кобальт.** Среднее содержание в исходных породах Co равно  $1 \cdot 10^{-3}\%$ . Распределение относительно равномерное.

В процессе нагревания в средней части разреза (см. рис. 17) сформировалась сложная извилистая зона (мощностью 0,5—1 м) пониженных содержаний (до  $5 \cdot 10^{-4}\%$ ). Наибольшей сложностью зона отличается в области очага нагрева, где ее мощность увеличивается, и она переходит в «столб» пониженных содержаний. В целом Co несколько выносятся из зоны нагрева и породы, прилегающие к нагревателям, обеднены им.

**Никель.** Содержание Ni в исходных породах изменялось от  $1,7 \cdot 10^{-3}$  до  $2,5 \cdot 10^{-3}\%$  при относительно равномерном распределении.

Средние содержания рудных элементов по областям нагревания (%)

Элемент	Зона нагревания			
	<30°C	30—50°C	50—100°C	>100°C
	Количество проб			
	14	66	38	48
Mo	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$1,8 \cdot 10^{-4}$	$1,7 \cdot 10^{-4}$	$2,1 \cdot 10^{-4}$
Pb	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$
Cu	$6,2 \cdot 10^{-3}$	$5,0 \cdot 10^{-3}$	$5,0 \cdot 10^{-3}$	$3,2 \cdot 10^{-3}$
Ni	$6,5 \cdot 10^{-3}$	$4,7 \cdot 10^{-3}$	$5,3 \cdot 10^{-3}$	$5,1 \cdot 10^{-3}$
Co	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$
Zn	$5,1 \cdot 10^{-3}$	$4,6 \cdot 10^{-3}$	$4,2 \cdot 10^{-3}$	$4,2 \cdot 10^{-3}$

После нагревания дисперсия содержания его значительно увеличивается (от  $7 \cdot 10^{-4}$  до  $9,5 \cdot 10^{-3}\%$ ). Общий характер распределения элемента при наложении неоднородного теплового поля заметно усложняется (см. рис. 17). Конфигурация изоконцентрат Ni вырисовывает типичную чашеобразную структуру, характеризующуюся относительно пониженным содержанием, в строении которой отчетливо прослеживаются элементы структуры тепловых потоков.

Участки с повышенными количествами Ni тяготеют к верхним частям очага нагрева и к приповерхностному слою над областью нагрева.

Общая тенденция накопления Mo и Pb вблизи очага нагрева и относительная миграция Cu, Ni, Zn и отчасти Co в область пониженных температур намечается и по средним содержаниям этих элементов, подсчитанным для областей разной интенсивности нагревания (табл. 34).

Нагревание крупного блока пород с высокой естественной влажностью (до 18%) позволило создать объемную термоконвекционную флюидную систему. Тип этой системы и ее внутреннее строение определились геолого-физическими условиями экспериментального блока. Внутренняя структура сложной флюидной термоконвекционной системы в ходе опыта фиксируется полями температур и тепловых потоков и в конечном итоге отражается в особенностях распределения рудных подвижных элементов. В опыте 1970 г. на лессах была получена симметричная «чашеобразная» термоконвекционная структура.

### НАГРЕВАНИЕ СИЕНИТО-ДИОРИТОВ

Термоградиентный нагрев неоднородного блока сиенито-диоритов в коренном залегании и последующий детальный статистический анализ геолого-физических, теплофизических и геохимических характеристик экспериментального блока позволяют отметить ряд особенностей изменения пород в термоградиентном поле (локальный нагрев до 900°C с градиентами от 0,5 до 3,0°C/м).

При нагревании в экспериментальном блоке сформировалось сложное температурное поле, напоминающее антиклиналь, в которой выделяются четыре очага нагревания (Н<sub>1-4</sub>). При этом очаги нагревания Н<sub>2</sub> и Н<sub>3</sub> расположены ближе к поверхности блока и друг к другу — они образуют единую область (ядро) нагревания в верхней части антиклинали.

В результате нагревания в сиенито-диоритах произошло перераспределение влаги. Около каждого нагревателя (на удалении 0,15—0,6 м) формируются локальные максимумы влажности, в которых влажность возрастает в 1—2 раза. Непосредственно около нагревателей породы высушиваются и влажность их снижается в 2—3 раза.

После нагревания рудные компоненты существенно перераспределяются. При этом отмечено, что наиболее интенсивные изменения происходят в областях нагревания и в участках, прилегающих к ним. Так, если сравнивать генеральные средние содержания рудных по всему блоку пород и по очагам нагревания, это особенно четко видно. Приращения количеств рудных по этим областям равны (г/т): Zn (—8,9 и —30,3), Cu (—5,8 и —47,0), Pb (—0,6 и —8,5), Mo (—0,2 и +2,4), Co (+0,1 и —3,7), Ni (+1,5 и +4,7), сумма рудных (—13,9 и 89,4). Из приведенных цифр следует, что в областях нагревания геохимическая тенденция поведения элемента (вынос) при нагревании сохраняется (за исключением Mo). Однако количества мигрирующих веществ возрастают в 20—40 раз.

При нагревании существенно изменяется среднее содержание элементов в блоке в зависимости от глубины. При анализе содержания рудных перед опытом выяснилось, что их среднее содержание с глубиной сокращается. Это особенно отчетливо фиксировалось на глубинах 2 и 2,25 м.

При этом содержание Ni, Co, Zn с глубиной снижается плавно. Для Pb, Cu и Mo наблюдаются дифференцированные изменения содержания с глубиной. На кривых распределения выделяются острые максимумы. Так, максимум Pb приурочен к глубине 0,75 м (47,9 г/т), а на глубине 2,25 м содержание его составляло лишь 11,5 г/т.

В результате нагревания на большинстве глубинных уровней в блоке наблюдается суммарный вынос рудных элементов относительно их исходных количеств. Баланс для всех уровней отрицательный и составляет —98,2 г/т. Отдельные элементы ведут себя при этом специфично, образуя локальные зоны (участки) обогащения и обеднения.

На общем фоне выноса отдельные элементы проявляют обратную геохимическую тенденцию — привнос.

В областях нагревания вынос большинства рудных элементов происходит до глубины 1 м, а привнос — на больших глубинах. Если сравнить общий баланс рудных компонентов всего блока и областей нагревания, то окажется, что во всем блоке вынос суммы рудных составил 113,2 г/т, а в областях нагрева — всего 3,3 г/т.

В зависимости от особенностей исходных сиенито-диоритов, слагающих отдельные участки экспериментального блока, рудные элементы при нагревании ведут себя дифференцированно. В частности, железные сиенито-диориты (I тип пород) характеризуются увеличением содержания Pb, Co, Ni и Cu примерно на 35% относительно исходных; количество Zn и Mo в них несколько понижается. У II типа пород (хлоритизированные сиенито-диориты) суммарный прирост рудных составил 11,7 г/т (при уменьшении количества Cu и Mo). Приращением количества рудных компонентов характеризуются породы V типа (осветленные и богатые окислами железа породы), которое составило 22,4 г/т; III (калишпатизированные) и IV (осветленные и давленные) типы пород характеризуются выносом всей суммы рудных элементов до —18,7 и —28,7 г/т соответственно.

Если учитывать приращения суммы элементов от генеральных средних для каждого типа пород до нагревания и после, то ряд этих приращений будет иметь следующий вид (г/т): тип I—(—10,1); II—(—52,4); III—(—1,2), IV—(+5,0); V—(—22,7). При сравнении с генеральной средней по блоку: тип I—(+10,4); II—(+11,7); III—(—18,7); IV—(—28,7); V—(+22,4).

При нагревании блока элементы в пределах выделенных структурных областей ведут себя различно. Привнос — вынос суммы рудного вещества лежит в пределах от +55,5 до —46,6 г/т.

Для первой группы структурных единиц (I—V) отмечается привнос всех (исключая Zn) исследованных элементов. Для второй группы структур (VI—X) характерен вынос (кроме Ni).

Качественное и количественное сопоставление полей температур и геохимических полей элементов позволяет отметить ряд особенностей перераспределения рудных компонентов в неоднородном тепловом поле. Обратим внимание на следующие геохимические показатели: изменения диапазонов содержаний элементов, колебания дисперсий и средних содержаний и некоторые другие.

Рудные элементы в неоднородном тепловом поле могут характеризоваться тенденцией либо к рассеиванию, либо к концентрации (табл. 35, 36). Так Mo и Cu подвержены в этих условиях относительной концентрации (изменчивость их до и после нагревания равна для Cu — 61,36 и 51,99; а для Mo — 166,68 и 49,03; основное отклонение — соответственно для Cu — 31,7 и 23,4; для Mo — 5,0—1,4).

Из всех областей нагревания сениито-диоритов происходит преимущественный вынос суммы рудных элементов. Особенно значителен он для интервалов нагревания до 100°C.

Так, для зоны нагревания < 50°C вынос суммы рудных составил (г/т) 19,1, для зоны нагревания 50—100°C — 47,5, в зоне 100—300°C наблюдается привнос до 42,2 рудных и в зоне нагрева > 300°C — вынос до 53,9 рудного вещества.

Для отдельных очагов нагревания блока сениито-диоритов наблюдаются следующие количества количества привноса — выноса суммы рудных (г/т): N<sub>1</sub> — вынос 67,9; N<sub>2</sub> — вынос 78,6; N<sub>3</sub> — привнос 204,7 и N<sub>4</sub> — вынос 149,4.

Изменение содержания рудных элементов, г/т

Элемент	До нагревания			После нагревания		
	максимум	минимум	разность	максимум	минимум	разность
Pb	16,0	4,6	11,4	200	2	198
Co	35,0	7,0	28,0	30,0	2,0	28,0
Ni	18,0	2,9	15,1	36,0	1,3	34,7
Zn	94,0	22,0	72,0	70,0	12,0	58,0
Cu	100	10	90	100	5	95
Mo	4,2	1,1	3,1	13,0	1,2	11,8

Т а б л и ц а 36

Дисперсия и изменчивость содержаний рудных элементов в экспериментальном блоке

Элемент	Ошибка среднего	Среднее, г/т	Крутость	Косость	Изменчивость	Основное отклонение
Pb	± 2,1	33,5	6,29	2,09	73,45	24,6
	± 2,2	32,9	39,06	5,26	103,38	33,9
Co	± 0,7	14,4	50,10	5,85	58,49	8,4
	± 0,6	14,5	40,37	4,75	66,37	9,6
Zn	± 1,2	44,6	1,67	0,95	32,38	14,4
	± 0,8	35,7	-0,28	0,06	34,92	12,5
Ni	± 0,4	8,1	6,56	1,98	58,77	4,3
	± 0,4	9,6	8,06	7,16	67,98	6,5
Cu	± 2,6	50,8	12,48	2,15	61,36	31,7
	± 1,5	45,0	-0,22	0,50	51,99	23,4
Mo	± 0,4	3,03	92,44	9,25	166,68	5,0
	± 0,09	2,84	3,85	1,83	49,03	1,4

Примечание. Здесь и далее — в числителе — содержание элемента до нагревания, в знаменателе — после.

В процессе нагревания заметно изменилась конфигурация участков с различными содержаниями рудных компонентов. Заметную роль при этом наряду с очагами нагрева играли структурные элементы блока.

**Молибден.** Отчетливо выраженная «столбовая» концентрация Мо фиксируется в области нагревания  $H_1$ , особенно в пределах проходящей несколько левее тектонически ослабленной зоны (структурная область I, см. рис. 26). Некоторое обогащение Мо верхней части этой зоны было зафиксировано и при опробовании исходного блока до эксперимента. Однако после эксперимента концентрация элемента резко усилилась, а максимум сместился в нижнюю часть тектонической зоны, ближе к нагревателю. С внешней от нагревателя стороны (в области низких температур) зона концентрации Мо оконтуривается участками с пониженными (приблизительно в два раза относительно исходного опробования) содержаниями элемента. Такие же четкие ограничения зоны концентрации наблюдаются и со стороны нагревателя, особенно с участками, непосредственно примыкающими к последнему (содержание Мо после нагрева здесь практически не изменилось).

Три относительно изолированных участка концентрации образовались и правее нагревателя, также на некотором удалении от области максимального нагрева в пределах относительно монолитных пород (структурная область II, см. рис. 26).

Фактически в области проявления теплового поля, наведенного нагревателем  $H_1$ , в процессе активизации и мобилизации элемента, рассеянного среди вмещающих пород, было сформировано «рудопроявление» (с десятикратной концентрацией Мо в отдельных частях), характеризующееся специфическим распределением рудного компонента, обусловленным, с одной стороны, геолого-структурными особенностями участка, с другой — характером существовавших тепловых потоков.

Около трех других нагревателей такой отчетливой концентрации Мо не наблюдается. В частности, для двух средних нагревателей, расположенных ближе к поверхности блока, это обусловлено тем, что здесь не создавались условия для существования замкнутых тепловых потоков, сказывалось взаимное влияние и нерегулярный режим их работы. Несколькими концентрируется Мо над нагревателем  $H_3$  в приповерхностной зоне блока.

**Медь.** Характер распределения элемента после эксперимента заметно изменился (см. рис. 25). Однако концентрации Cu, как это было зафиксировано для Мо в районе нагревателя  $H_1$ , не установлено. Наоборот, зоны повышенного содержания, отмеченные в исходном блоке около нагревателя  $H_1$  (висячем боку тектонической зоны — структурная область I), после эксперимента были разубожены. Зона относительно повышенной концентрации Cu сформировалась на некотором удалении от нагревателя, в приповерхностной части блока, около левачего бока тектонической зоны.

Заслуживает внимания образовавшаяся в процессе нагревания область повышенного содержания Cu в средней части блока между  $H_3$  и  $H_4$  (в районе относительно низкотемпературного нагрева). Формирование ее обусловлено, очевидно, влиянием нагревателей  $H_2$ ,  $H_3$  и  $H_4$  при повышенной роли  $H_4$  (наиболее активного и глубоко расположенного). Пространственно эта область совпадает с областью низкого содержания Мо (пониженного даже относительно первичных содержаний в исходном блоке).

**Свинец.** После эксперимента зафиксированы две более или менее отчетливые области концентрации Pb (см. рис. 21). Одна из них в районе  $H_1$  полностью совпадает с образовавшейся здесь же областью повышенных содержаний Cu (максимальные содержания Pb и Cu

определены в одних и тех же пробах, при прямой корреляции между элементами).

Вторая область повышенной концентрации Рb (значительно превосходящая первую) проявилась правее нагревателя Н<sub>4</sub> с образованием в ней своеобразного узкого «рудного столба» (с максимальным содержанием Рb в приповерхностной части блока), пространственно совпадающего с тектоническим нарушением в пределах структурной области IX. Характерно, что при этом произошло заметное «разубоживание» участков блока, расположенных непосредственно над нагревателем Н<sub>4</sub>, т. е. здесь проявляется тенденция, характерная для Рb при нагревании лессового блока. Произошло некоторое обогащение Рb участков, примыкающих к нижним частям нагревателей Н<sub>3</sub> и Н<sub>4</sub>.

**Цинк.** После нагревания блока сократились площади относительно повышенного содержания Zn (см. рис. 24), что связано с общим выносом элемента за пределы экспериментального блока. Сохранившиеся обогащенные участки приобрели отчетливую столбообразную форму с некоторым обогащением верхних частей. Однако содержание Zn в «столбах» не превышает его содержания в обогащенных зонах исходного блока.

Характерно, что наиболее существенный вынос цинка устанавливается для тектонических зон повышенной проницаемости, особенно если последние захватывают область очага нагрева (как, например, тектоническая зона структурной области I).

**Кобальт.** В процессе нагревания блока происходит обеднение Co участков, непосредственно примыкающих к нагревателям (см. рис. 22). Как и в случае с Zn, отчетливо устанавливается формирование после эксперимента столбообразных зон обогащения, возникающих на некотором удалении от нагревателей. В частности, хорошо выраженный «столб» наблюдается правее и несколько выше нагревателя Н<sub>1</sub> в тектонически ослабленной зоне структурной области II. Некоторое повышение содержания Co отмечается и в тектонической зоне левее нагревателя Н<sub>1</sub>. Но, очевидно, ввиду высокой проницаемости эта зона была мало благоприятна для концентрации такого элемента. Заметно обеднена Co узкая столбообразная зона, располагающаяся непосредственно над нагревателем Н<sub>1</sub>. По своей конфигурации и положению относительно нагревателя она имеет много общего с зоной пониженных содержания Рb.

Отчетливая (также столбообразной формы) зона обогащения проявилась между нагревателями Н<sub>3</sub> и Н<sub>4</sub>, а также правее и выше нагревателя Н<sub>4</sub> в приповерхностной части блока. В то же время область высокого содержания Co (максимального в исходном блоке), располагавшаяся над нагревателем Н<sub>4</sub>, перестала существовать (содержание элемента на этом участке после эксперимента сократилось в 3—4 раза).

После нагревания блока намечается приуроченность участков повышенного содержания Co к тектонически ослабленным зонам. Однако в наиболее проницаемой зоне структурной области I, в нижней части которой располагается нагреватель Н<sub>1</sub>, обогащение элементом минимальное (по сравнению с другими зонами).

**Никель.** Распределение Ni (см. рис. 23) после эксперимента имеет много общего с распределением Co. В частности, после нагревания блока в нем зафиксированы три основные области концентрации Ni, пространственно и во многом морфологически совпадающие с областями повышенных содержаний Co. Проявились также и столбообразные зоны обеднения над нагревателями Н<sub>1</sub> и Н<sub>4</sub> (особенно над наиболее активным нагревателем Н<sub>1</sub>).

Если анализировать рассматриваемые элементы в совокупности, то можно отметить преимущественное тяготение участков повышенных



концентраций Мо к очагам нагрева (особенно к тектоническим зонам повышенной проницаемости, сопряженным с очагом нагрева) и обеднение областей нагрева другими элементами (в отдельных участках высокотемпературного прогрева иногда отмечается относительная концентрация Pb). На некотором удалении от очагов нагрева, также преимущественно в тектонически ослабленных зонах (но относительно пониженной проницаемости), фиксируются столбообразные участки обогащения Ni, Co и отчасти Zn. Cu, встречающаяся иногда в повышенных количествах в тех же участках, что и два последних элемента, в целом мигрирует дальше от очага нагрева, где и образует островные участки обогащения, иногда совместно с Pb. Островные участки обогащения на удалении от нагревателей отмечаются и для других элементов (в частности, для Mo).

### АНАЛИЗ КОЭФФИЦИЕНТОВ ВАРИАЦИИ СОДЕРЖАНИЙ РУДНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ПОРОДАХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО БЛОКА

В рудной геологии коэффициент вариации часто используется для характеристики размаха колебаний содержания компонентов, что в известной степени отражает и генетические особенности рудоносных пород (Смирнов, 1957; Шаратов, 1952; Барышев, 1937; Крейтер, 1940).

В частности, Н. В. Барышевым и В. М. Крейтером (1940) было предложено разделить рудоносные тела по коэффициентам вариации V на четыре группы:

Таблица 37  
Коэффициенты вариации (V, %) содержания рудных элементов

Зона нагрева, °C	Cu	Ni	Mo	Co	Zn	Pb
------------------	----	----	----	----	----	----

#### Площадка 1

<30	33,2	27,3	73,6	15,5	17,8	41,5
30—50	23,7	36,9	74,1	40,1	28,8	55,1
50—100	44,7	35,0	62,1	31,7	24,8	46,6
>100	50,4	30,9	58,2	34,2	31,5	24,2

#### Площадка 2

<30	24,8	24,8	74,0	21,2	17,5	20,9
30—50	45,0	37,7	68,7	52,0	21,2	47,6
50—100	44,0	42,0	77,12	49,8	23,9	35,5
>100	39,7	40,6	62,9	71,9	27,4	41,4

нагревание усиливает неоднородность содержания Cu, Co, Zn, Ni и отчасти Pb. Коэффициент вариации Mo уменьшается (с 74 до 58%, см. табл. 37).

Более сложные изменения V наблюдаются в блоке сиенито-диоритов в целом:

	Pb	Co	Zn	Ni	Cu	Mo
До нагрева- ния	73,5	58,5	32,4	52,8	61,4	166,7
После нагре- вания	103,4	66,4	34,9	68	52,0	49,0

С нагреванием неоднородность распределения Pb, Co, Zn, Ni возрастает, а Cu и Mo снижается.

По областям нагревания величины V изменяются сходным образом (табл. 38).

Для ряда элементов Co, Ni, Zn, Pb, Cu, Mo характерно следующее распределение знаков приращения коэффициента V.

Тип породы	Сочетание знаков
I	+ - - + - +
II	+ + + - - +
III	- - + + - +
IV	+ + + + - -
V	+ - - + + -

Изменчивость распределения возрастает у Co и Pb.

Если рассматривать ряд элементов в последовательности Zn, Ni, Co, Pb, Cu, Mo, то зоны нагревания H<sub>1</sub>—H<sub>4</sub> (области нагрева I—IV) будут иметь следующий набор знаков приращения коэффициента V после нагревания.

Область нагрева	Сочетание знаков
I	+ + + - - -
II	- - - + - +
III	+ - - + - +
IV	- + - + + -

Определенной зависимости здесь не наблюдается (количества + и - равны).

Характер поведения коэффициента вариации по типам пород показан в табл. 39, а по тектоническим структурам — в табл. 40.

Для тектонических элементов характерны следующие сочетания приращений коэффициентов V рудных компонентов в ряду Co, Pb, Ni, Zn, Cu, Mo.

Тектонический элемент	Сочетание знаков
I	+ - + + + +
II	+ + + + - +
III	+ + + + + +
IV	+ + + + + +
V	+ + - + + +
VI	+ - + + - +
VII	+ + - - - +
VIII	- - - - - -
IX	- + - - + -
X	+ + - - - +

Для тектонических элементов I—VI характерно преимущественное возрастание коэффициента вариации после нагревания, а для элементов VII—X уменьшение. Максимальное приращение может достигать плюс 148,2%, а убыль минус 221%.

Таблица 38

Изменения коэффициента V по областям нагревания сиенито-диоритов

Область нагрева	Zn	Ni	Co	Pb	Cu	Mo
I	31,4	40,6	31,6	10,4	59,8	110,1
	38,5	63,2	120,6	94,9	50,4	58,1
II	36,5	56,6	41,0	53,0	99,7	33,2
	31,8	38,8	38,7	93,5	49,7	49,6
III	18,4	42,9	109,3	39,4	36,3	40,0
	20,9	27,2	50,7	41,4	31,4	45,9
IV	30,7	57,3	37,3	55,1	33,7	247,5
	24,7	105,3	36,7	115,6	54,5	34,1

Таблица 39

Коэффициенты вариации для отдельных типов пород

Тип породы	Co	Ni	Zn	Pb	Cu	Mo
I	35,5	35,5	35,1	37,5	42,0	27,9
	60,5	34,2	27,8	90,3	38,2	31,4
II	29,3	26,9	26,8	67,7	55,2	23,0
	86,3	101,7	38,5	59,0	50,3	53,7
III	122,4	33,0	41,2	34,0	67,7	36,3
	52,7	26,5	47,9	49,4	44,9	56,3
IV	23,8	32,3	23,1	84,7	95,2	114,0
	3,9	54,8	35,3	89,4	53,8	57,6
V	35,5	60,5	31,2	44,5	38,1	232,6
	41,2	38,6	28,4	112,7	54,4	33,3

Таблица 40

Коэффициенты вариаций содержания рудных в тектонических элементах

Тектоническая структура	Co	Pb	Ni	Zn	Cu	Mo
I	25,4	112,7	18,1	9,3	34,5	28,5
	60,1	69,4	25,1	28,9	31,0	59,5
II	10,7	10,7	13,9	21,5	65,2	22,7
	35,4	158,9	71,2	21,6	47,2	59,3
III	8,0	12,2	8,1	14,3	5,3	17,1
	64,0	48,4	16,8	30,1	32,0	49,7
IV	13,7	16,4	13,5	10,7	42,5	16,4
	37,2	127,5	116,2	38,5	48,0	38,2
V	9,4	13,3	29,5	22,6	27,9	14,1
	26,8	48,7	13,9	22,9	47,5	31,2
VI	26,2	100,1	39,1	36,1	66,5	121,1
	133,4	90,1	72,6	40,9	50,4	53,9
VII	39,0	53,4	55,0	36,0	100,5	32,9
	30,4	95,3	38,9	29,9	49,6	50,1
VIII	100,9	40,9	49,0	18,1	41,9	40,1
	29,1	40,6	27,4	19,8	28,8	26,7
IX	42,9	55,6	59,7	29,8	34,6	250,7
	33,1	80,5	38,7	25,7	55,6	29,7
X	30,0	26,8	31,6	46,8	72,0	22,6
	49,1	72,2	26,6	42,2	56,8	39,6

Таблица 41

Изменения коэффициентов вариации для отдельных зон нагревания (до и после нагрева)

Зона нагрева, °C	Zn	Pb	Co	Ni	Cu	Mo
<50	35,1	48,2	31,6	58,6	67,7	28,1
	41,7	107,3	52,8	51,8	52,6	53,7
50—100	22,0	72,1	82,5	40,6	55,9	115,4
	36,7	73,4	86,4	99,6	53,8	50,9
100—300	33,1	87,1	44,4	49,9	45,1	47,7
	31,1	137,1	68,7	42,2	46,8	48,1
>300	28,4	80,7	36,5	53,0	58,8	44,9
	27,0	57,9	46,8	42,4	51,7	42,6

Сочетание знаков приращений коэффициента V в рассматриваемом случае характеризуется следующей матрицей:

Зона нагревания, °C	Zn	Pb	Co	Ni	Cu	Mo
< 50	+	+	+	-	-	+
50—100	+	+	+	+	-	-
100—300	-	+	+	-	+	+
> 300	-	-	+	-	-	-

Поведение V для всего экспериментального блока при разных температурах отражено в табл. 41.

## Глава 5

### ПРОЕКТ КРУПНОПЛАНОВОГО ГЕОЛОГО-ФИЗИЧЕСКОГО ПОЛИГОНА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГЕОХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Учитывая опыт лабораторных и полевых экспериментальных геохимических исследований, мы разработали общий проект создания стационарного крупнопланового геолого-физического полигона\*.

#### ПРИНЦИП УСТРОЙСТВА ПОЛИГОНА, ТИПЫ РЕАКЦИОННЫХ КАМЕР

В качестве полигона моделирования геохимических процессов предлагается использовать блок горных пород в естественном или разрыхленном состоянии, в центральную часть которого введен длительно действующий источник тепла и вещества. С момента начала действия источника тепла и вещества такой блок играет роль реакционной камеры (РК). Особенностью работы реакционной камеры является длительное существование нестационарных полей температуры, давления, увлажнения и концентраций, в результате чего возникает направленный процесс минералообразования.

Возможность регулирования температуры источника в РК, а также учет различных параметров в ходе этого потока вещества в РК и конт-

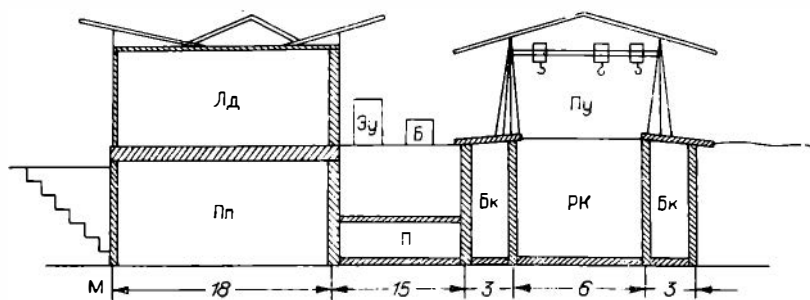


Рис. 27. Общая схема геолого-физического полигона.

Лд — лабораторный дом; Пп — подвальное помещение; Эу — энергетическая установка; Б — бойлер; П — переход; Бк — боковые камеры; РК — реакционная камера; Пу — погрузочное устройство.

\* Одним из соавторов проекта является В. Д. Пампура (Институт геохимии СО АН СССР).

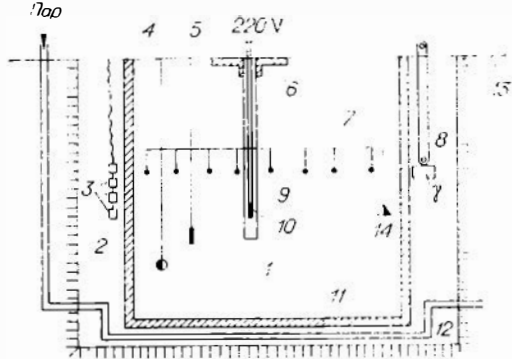


Рис. 28. Схема устройства реакционной камеры (РК).

1 — рабочая камера; 2 — боковая камера; 3 — приемник гамма-лучей; 4 — физико-химические датчики; 5 — датчики тепловых потоков; 6 — заглушка; 7 — датчики температуры; 8 — источник гамма-лучей; 9 — скважина для нагревателя; 10 — нагреватель; 11 — ванна; 12 — вводы пара; 13 — коренные породы; 14 — отбор раствора.

ной камеры в общем виде приведено на рис. 28.

Блок термостатирования — окружающее реакционную камеру пространство (см. рис. 27), предназначенное для изоляции камеры от тепловых или иных воздействий с боковых сторон; зона размещения  $\gamma$ -лучевой установки и размещения выводов всех измерительных и регулирующих устройств.

Устройство для создания температурного градиента находится в полу реакционной камеры и представляет собой змеевик из стальных труб в плоскости пола, через змеевик пропускается высокотемпературный пар, расход которого контролируется.

Наблюдательная площадка находится над реакционной камерой, с различной контрольной аппаратурой и пультом управления установкой; имеет надежную защиту от непогоды, средства дозиметрического контроля, специальное освещение, пожарное оборудование.

Пункт управления и наблюдения за экспериментом, где находится потенциометрическая и другая аппаратура, непосредственно следящая за различного рода датчиками, помещенными в тело реакционной камеры. Пункт является хорошо оснащенной лабораторией с широким ассортиментом аппаратуры для тепловых и физико-химических измерений; она располагается непосредственно у реакционной камеры; помещение оборудовано для круглосуточного дежурства и экстренного ремонта следящей аппаратуры.

В подвальном помещении планируется постановка экспериментов на мелких (до 1—2 м<sup>3</sup>) блоках породы. Подвальное помещение соединяется подземным ходом с блоком термостатирования рабочей камеры.

## МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Реакционная камера. Основное назначение РК — ведение процесса минералообразования. РК представляет собой емкость в виде куба объемом до 500—1000 м<sup>3</sup> с соответствующим механическим оборудованием для погрузки и выгрузки геологического материала. Стенки камеры бетонные, снаружи она оборудована различными средствами управления и наблюдения, наиболее важными из которых являются:

роля выходящего потока вещества из РК создает предпосылки для управления процессом минералообразования.

Значительные размеры РК (объем 0,5—1 тыс. м<sup>3</sup> и больше) и локальность самой реакционной зоны создают возможности для осуществления длительно протекающих процессов от нескольких месяцев до 1 года.

Полигон состоит из следующих сооружений (рис. 27):

Реакционная камера — емкость, заполняемая породой, в которую помещаются нагреватели, вводы газов и растворов и различные датчики физико-химических параметров. Устройство реакцион-

1. Установка просвечивания пород для исследования полей влажности.

2. Система труб и вводов с вентилями в стенах РК для отвода и введения гидротермального раствора и осуществления локального расплавления пород.

Предполагалось измерение таких параметров: поля температур и тепловых потоков, динамика влажности; электрические свойства, миграция отдельных рудных элементов; измерения давлений, проницаемость, скорость циркуляции раствора, рентгеноскопия, радиометрия, магнитные измерения, мощность нагревателей, ультразвуковая диффектоскопия, радиопросвечивание, шумы и их измерение, измерения окислительно-восстановительных потенциалов, тепловые эффекты; скорость упругих волн, газовыделение и анализ газов, коэффициенты теплопередачи, эффективная теплопроводность и др.

Возможно проведение следующих типов исследований: моделирование рудных районов и рудных полей, локальное плавление, модели разных геологических элементов (контакты, дайки и т. д.), моделирование типов термоаномалий и гидротермальных систем, геологические процессы и электричество, геологические процессы и магнетизм, изучение тепловой активизации вещества, его переноса, отложения и перераспределения, энергетика процессов и явлений; тепло-массоперенос, разработка моделей геологических тел и процессов, исследование теплофизических геологических структур и их динамики, миграция теплового очага и др.

Типы реакционных камер. В зависимости от круга решаемых задач для любых видов заполняющей среды (породы) и различных вариантов подогрева снизу можно осуществить разные типы РК (рис. 29) в целях:

1. Расплавление пород в вертикальной скважине в «сухих» условиях.
2. Создания закрытого очага плавления.
3. Подачи раствора в зону прогрева пород над расплавом.
4. Подачи раствора снизу в виде столба.
5. Создания зоны фильтрации гидротермального раствора под давлением из перфорированной трубы с отводом части раствора.
6. Создания модели ореола зоны растекания растворов под давлением из перфорированной трубы.

## ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

При подготовке РК к эксперименту составляется пространственная схема опыта, указывающая, в каких участках РК сосредоточиваются различные датчики температуры, давления, тепловых потоков и т. д.; определяется местоположение скважины для расплавления пород или подачи гидротермального раствора.

В объеме камеры временно закрепляются датчики и камера постепенно заполняется породой. Достаточно тонко измельченная порода хо-

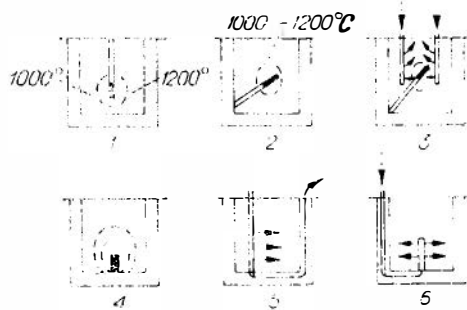


Рис. 29. Типы реакционных камер и режимы нагревания.

1 — сухой нагрев вертикальным нагревателем внутри РК; 2 — сухой нагрев наклонным нагревателем в центре РК; 3 — нагрев наклонным нагревателем вниз с подводом раствора в центре РК; 4 — сухой нагрев с вертикальным нагревателем, расположенным внизу РК; 5 — нагрев рабочей камеры раствором, подводимым сбоку РК; 6 — нагрев РК двусторонним симметричным потоком раствора.

рошо поддается уплотнению и создает надежные контакты с поверхностью датчиков.

После заполнения породой РК уплотняется или цементируется влагоудерживающими цементами. В процессе заполнения РК породы анализируются, особенно в зоне наиболее интенсивных химических превращений. На этой основе в дальнейшем строятся карты распределений химических и физических параметров среды в объеме камеры.

Исследуются физическое состояние и теплофизические свойства пород; тепловые поля и потоки, влажность, плотность и т. д. Проверяется готовность к пуску всей следящей за процессом аппаратуры (момент 0 — начало отсчета времени работы контролируемого процесса). После подготовки РК к работе начинается нагрев или пуск раствора в соответствии с типами реакционных камер.

В ряде случаев запуск процесса предваряется созданием различных управляемых термодинамических условий и сред в РК.

Термодинамические условия:

- 1) увлажнением заполняющих камеру пород создается неодинаковое влажностное поле;
- 2) неоднородное тепловое поле, созданное путем подогрева снизу;
- 3) газонасыщение пород в камере;
- 4) электрическое или магнитное поля;
- 5) неоднородная концентрация того или иного вещества;
- 6) неоднородное поле  $E_b$ — $pH$  в поровых растворах пород, заполняющих камеру.

Варианты создания различных сред:

- 1) однородная пористая среда;
- 2) однородная среда с двойной пористостью;
- 3) слоистая среда с двойной пористостью;
- 4) слоистые и однородные среды с дизъюнктивными нарушениями;
- 5) слоистые среды с резко различающимися физическими и теплофизическими свойствами слоев.

После установки соответствующих начальных и граничных условий задачи, создания среды и пуска процесса управление процессом осуществляется в соответствии с разработанной программой. По завершению наблюдений информация математической обрабатывается. Съем данных конечного результата подразделяется:

- а) отбор проб по определенной сетке и профилям по всей площади, объему РК и на поверхности, что связано с демонтажом модели;
- б) отбор проб поровых растворов специальными пробоотборниками, исключающими окисление растворов;
- в) измерение физического состояния остывших пород.

Математическая обработка информации подразделяется:

- а) статистическая обработка результатов измерений,
- б) построение математической модели исследованного процесса.

#### **КООРДИНАЦИОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ГРУППА И ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА**

Результаты эксперимента несут значительное количество информации, требующей быстрой обработки как в научных целях, так и в целях постановки последующих экспериментов. Сложность и разнообразие информации потребуют привлечения для ее обработки математиков-программистов, теплофизиков и физико-химиков.

Задача координационно-вычислительной группы сводится к *планированию постановки последующего эксперимента*, выдаче основных параметров прошедшего эксперимента и к построению модели процесса.

Техническое обслуживание эксперимента заключается в подготовке к работе РК, контрольно-измерительных приборов, ремонте и обслуживании аппаратуры в процессе эксперимента.

Техническая группа должна состоять из специалистов по контрольно-измерительным приборам, в области гидротермального эксперимента и техника-электрика.

## **ПЕРВООЧЕРЕДНЫЕ ЗАДАЧИ КРУПНОПЛАНОВОГО ЭКСПЕРИМЕНТА**

Опыт организации, проведения и анализа результатов модельных геологических исследований на крупных блоках горных пород позволяет наметить ряд задач, решение которых возможно при помощи разрабатываемой методики моделирования.

### **Физико-химические закономерности**

#### *I. Моделирование взаимодействия гидротермальных растворов с породами в условиях повышенных температур и градиентов температур, давлений и концентраций*

1. Зональность распределения рудообразующих компонентов в неоднородном температурном и влажностном полях в однородных средах различного химического состава.

2. Создание метасоматических колонок различного типа и изучение распределения в них редких элементов; получение моделей ореолов рассеяния.

3. Гидрохимические барьеры, выражающиеся в резкой смене химической обстановки рудоотложения в результате:

- а) неоднородности состава пород;
- б) одного или нескольких уровней окисления фильтрующихся растворов;
- в) условий интенсивного дегазирования фильтрующегося раствора (трещиноватость, крупнопористый пласт и т. д.).

4. Резкая смена кислотности-щелочности вдоль колонны фильтрующегося металлоносного раствора в однородной среде.

5. Процессы бестрещинного жиллообразования в неоднородном температурном поле.

6. Геохимия поровых растворов, формирующихся в различных условиях температуры, давления, кислотности, подвижности растворов; зональность составов поровых растворов в пределах метасоматических колонок различного типа.

7. Физико-химические условия формирования металлоносных расолов в случае различного состояния и концентраций растворов.

8. Специальные исследования по моделированию процессов сульфидообразования в различных условиях.

#### *II. Моделирование взаимодействия расплавов с водонасыщенными породами в условиях высоких давлений*

1. Миграция рудообразующих элементов в температурно-влажностно-газовом ореоле в зоне тепломассообмена расплава с породами.

2. Миграция газов (хлор, фтор, углекислота, сероводород, водород, углеводороды) в зоне тепломассообмена расплава с породами.



# **Теплофизические и энергетические особенности**

## *I. Моделирование гидротермальных процессов*

1. Тепломассообмен в системе гидротермальной раствор — порода для нестационарного температурного поля.
2. Процессы выделения теплоты химических реакций.
3. Энергии активизации диффузионных процессов в гидротермальных условиях.
4. Формирование неоднородного температурного поля в зонах интенсивных химических превращений.

## *II. Моделирование магматических процессов*

1. Энергетический анализ эволюции расплавов.
2. Тепломассообмен между кристаллизующимися расплавом и влагонасыщенными породами в условиях различных геотермических градиентов.
3. Роль теплоты кристаллизации расплавов.
4. Интенсивная конвекция расплавов в неоднородном температурном поле.
5. Зарождение расплавов, локальное расплавление пород в условиях нестационарного температурно-влажностного поля.

## **Кинетика и динамика процесса**

### *I. Моделирование гидротермальных процессов*

1. Физические и физико-химические параметры тепломассообмена в гидротермальных условиях.
2. Кинетика различных химических превращений пород в гидротермальных условиях.
3. Динамика метасоматоза.
4. Физико-математический анализ динамики гидротермальной системы.
5. Динамика внутренних источников тепла в минералообразующих процессах.

### *II. Моделирование магматических процессов*

1. Изучение и физико-математический анализ динамики взаимодействия расплава с водонасыщенными породами в процессе его кристаллизации.
2. Динамика конвекции расплавов и условий тепломассообмена с окружающей средой.
3. Динамика формирования надвнутрузивных ореолов рассеяния вещества в различных геологических ситуациях.

## **Геофизические процессы**

1. Исследование возникающих в породах механических напряжений при моделировании процессов низко- и высокотемпературного минералообразования.
2. Моделирование процессов трещинообразования.
3. Исследование динамики полей силы тяжести, электрических и магнитных полей на поверхности над зоной очага расплава.
4. Использование различных микрометодов, геофизики в целях наблюдения за ходом моделируемых процессов минералообразования.
5. Исследование электропроводности пород, изменяющейся в процессе нагревания, увлажнения и расплавления.

Для гидротермальных месторождений, формирующихся на относительно небольших глубинах в условиях заметной обводненности окружающих пород, имеются убедительные данные об участии в эндогенном процессе подземных вод и возлечении в рудообразование компонентов этих пород. В качестве одного из определяющих факторов активизации и перераспределения компонентов (с возможной их концентрацией и образованием зональности) могут выступать термоградиентные тепловые поля, возникающие в районе проявления магматических масс, зон развития экзотермических реакций (например, метасоматические превращения) или за счет глубинных нагретых флюидов. Экспериментальная проверка этого явления путем неоднородного нагревания крупных блоков пород в условиях естественного залегания подтверждает этот вывод.

Нагревание крупного блока пород позволило создать полузамкнутую объемную термоконвекционную флюидную систему (что невозможно при экспериментах с отдельными образцами), внутреннее строение которой наряду с характером теплового поля определялось геолого-физическими особенностями экспериментального блока. Внутренняя структура термоконвекционной системы в конечном итоге была зафиксирована перераспределением рудных компонентов.

Несмотря на синхронное участие ряда рудных элементов в одной и той же искусственно созданной термоконвекционной системе, наблюдается существенное различие в их конечном распределении относительно источника нагревания. Рудные компоненты могут в единой гидротермальной системе создавать самостоятельные динамические замкнутые подсистемы со своими областями активизации, выноса, переноса и вторичного отложения (концентрирования).

Благодаря воздействию термоградиентного поля даже в случае квазиизотропных лессовидных пород, в экспериментальном блоке возникла и функционировала сложная термогидросистема с несколькими (не менее трех) локальными подсистемами, различающимися механизмами переноса энергии и вещества и со своими зональными рядами распределений переотложенных рудных элементов.

В пределах модельной термогидросистемы (рис. 30) выделяется несколько характерных зон и участков.

**Область I** «внутреннего тепломассопереноса, непосредственно примыкающая к тепловому очагу (нагрев 300—700°C), в которой вода

существует в виде паро-газовой смеси. Появление такой зоны отмечалось, в частности, при подземной газификации углей (Кононов, 1965). В этой области за счет интенсивного парообразования, диссоциации, повышения агрессивности флюида возникает более концентрированная подвижная фаза, что, очевидно, и обуславливает выпадение в этой области повышенных количеств отдельных элементов. Здесь же, по-видимому, наиболее широко проявлены процессы термодиффузии и термоосмоса. Наблюдается эффект термодиффузионного разделения вещества: более легкие элементы концентрируются ближе к нагревателю. Ряд зональности переотложенных элементов от нагревателя в случае лессовидных пород имеет вид (Co, Ni, Cu, Zn) — (Mo, Pb).

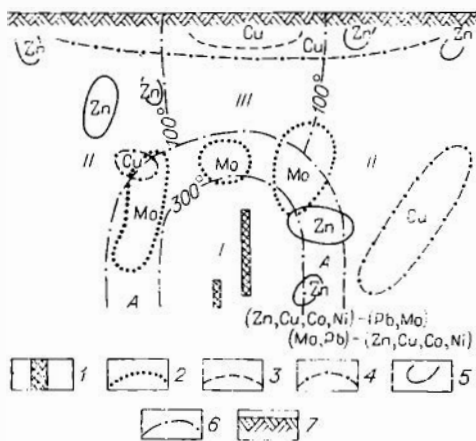


Рис. 30. Схема расчленения искусственно созданной в блоке лессовидных пород гидротермальной системы на ряд локальных подсистем.

1 — нагреватели. Границы областей концентрации элементов, %: 2 —  $Mo > 40 \cdot 10^{-4}$ , 3 —  $Cu > 9 \cdot 10^{-3}$ , 4 —  $Cu$  от 70 до  $90 \cdot 10^{-3}$ , 5 —  $Zn > 60 \cdot 10^{-3}$ , 6 — фазовые границы, 7 — дневная поверхность; I — область внутреннего теплопереноса; II — область внешнего теплопереноса; III — область сквозного теплопереноса, А — переходная зона.

а тяжелые элементы «оседают» у более нагретой границы подсистемы.

На планах распределения рудных элементов отчетливо выделяется еще одна локальная подсистема — область III «сквозного» теплопереноса, располагающаяся прямо над нагревателем. Распределение рудных в этой области столбообразное, формирование связано с термогравитационным эффектом поднятия нагретого флюида вверх. Геохимически эта подсистема детально нами еще не исследовалась.

Действие этих разнонаправленных механизмов транспортировки вещества в тепловом поле и связанная с ними различная динамика поведения отдельных элементов определяют, по-видимому, миграцию элементов в активизированных теплом геологических средах. Окончательное распределение рудных элементов в подобных случаях будет, естественно, зависеть как от схемы миграции, так и от физико-химических свойств самих элементов, геологической среды и условий осаждения.

Следует подчеркнуть, что рассмотренный выше наиболее простой случай формирования гидросистемы не исчерпывает все возможные ва-

ряд зональности переотложенных элементов от нагревателя в случае лессовидных пород имеет вид (Co, Ni, Cu, Zn) — (Mo, Pb).

Вторая локальная подсистема — область II «внешнего» теплопереноса (или область нагретых вод) имеет температуру  $< 100^\circ C$ , является зоной подтока растворов и характеризуется иной (обратной по сравнению с областью I) зональностью в распределении элементов от нагревателя, а именно: Mo, Pb, Co, Cu, Zn, Ni. Это распределение обусловлено перемещением вещества в направлении теплового потока. Легкие компоненты уносятся дальше от нагревателя к более холодным участкам системы,

рианты. Как правило, гидротермальные системы имеют более сложное внутреннее строение. Однако приведенный нами факт расчленения единой термофлюидной системы на ряд локальных областей со своими особыми механизмами теплообмена и перераспределения вещества, представляет большой интерес для геологии и требует самого пристального внимания.

Не менее важен еще один вывод, который можно сделать из всего изложенного выше. Наряду с широко известными и используемыми в геологии структурными и вещественными экранами роль геохимического экрана (барьера) могут выполнять отдельные специфические температуры (или интервалы температур) неоднородного температурного поля. Такой температурой может быть прежде всего изотерма  $100^{\circ}\text{C}$  (температура кипения воды при нормальном давлении). Роль температурных экранов могут выполнять температуры других фазовых переходов. Последнее обстоятельство и объясняет в ряде случаев факты появления в квазизотропных геологических средах (без структурных и вещественных неоднородностей) зональности, резких границ, гетерогенности.

Одной из причин формирования полузамкнутых локальных подсистем и расчленение единой гидротермальной системы на ряд областей может быть существование в горных породах различных связей воды. В пористой среде только в зависимости от формы связи воды с твердым телом возможно существование нескольких ее фаз. Так, еще В. И. Вернадский (1933) показал, что в твердом теле существует следующее равновесие: твердое тело — гигроскопическая вода — пленочная вода — капельно-жидкая вода. Этот ряд он называл рядом фазовых равновесий. Таким образом, гигроскопическая (гидратационная), пленочная и капельно-жидкая вода являются самостоятельными термодинамическими фазами и образуют соответственно граничную, приграничную и объемную фазы воды. Каждая из этих фаз характеризуется своими полями устойчивости в координатах  $PT$  и при нагревании формирует свои области активизации и существования.

Результаты нагревания лессовидных пород подтверждают существование, по крайней мере, трех температурных интервалов активизации воды: а) интервал до  $100^{\circ}\text{C}$  (активизация капельно-жидкой воды); б) интервал  $100\text{—}300^{\circ}\text{C}$  (активизация пленочной воды); в) интервал от  $300^{\circ}\text{C}$  и выше (активизация гидратной воды).

Активизированные в различных температурных условиях фазы воды могут обладать специфическими физико-химическими особенностями в перераспределении рассеянных рудных компонентов вмещающих пород. Н. И. Хитаров, Л. А. Арутюнян, С. Д. Малинин (1967), экспериментально изучив возможность миграции молибдена в паровой фазе молибдатных растворов при повышенных температурах, показали, что при температурах  $200\text{—}350^{\circ}\text{C}$  перенос молибдена становится заметным начиная с температуры  $250^{\circ}\text{C}$  и возрастает с увеличением нагрева (от единиц при  $250^{\circ}\text{C}$  до сотен  $\text{мг/л}$  при  $350^{\circ}\text{C}$ ). На основании этого делается вывод о возможности самостоятельной значительной роли докритического пара в миграции молибдена и, в частности, при образовании ореолов рассеяния вблизи молибденовых месторождений.

Еще раньше Н. И. Хитаров (1953) экспериментально показал, что в условиях повышенных температур возможно некоторое перемещение рудных компонентов и зарождения металлоносных термальных растворов за счет запаса влаги в самой горной породе при поступлении извне только тепла.

При нагревании крупного блока сиенито-диоритов, характеризующегося неоднородностью состава слагающих его пород и сложным структурным рисунком, возникающая термоконвекционная флюидная система представляется значительно сложнее, чем в случае нагревания блока относительно квазиизотропных лессовидных пород. Здесь мы еще более приближаемся к условиям развития гидротермального процесса в природной обстановке. Однако общий характер термоконвекционной зоны, включая и общие особенности перераспределения рудных элементов, сохраняется прежним.

На примере экспериментального блока сиенито-диоритов было показано, что под воздействием неоднородного теплового поля в процессе активизации и мобилизации рассеянных в породах компонентов в благоприятных структурах могут образовываться области повышенной концентрации элементов (своего рода «рудные проявления»). Анализируя распределение элементов в неоднородном тепловом поле, следует наряду с характером этого поля, учитывать геолого-структурные особенности областей, физико-механические, теплофизические и литологические особенности слагающих их пород.

Рассмотренный механизм может, очевидно, предполагаться в качестве одной из моделей участия вадозовых вод и рассеянных элементов окружающих пород в гидротермальном процессе.

Метод крупнопланового геолого-физического моделирования явлений тепломассопереноса на блоках пород объемом в несколько тысяч кубических метров в условиях их коренного залегания представляет новые принципиальные возможности для исследования сложных модельных систем, приближающихся к природным гидротермально-метасоматическим процессам.

**Арнольд Л. В.** Термодинамика и теплопередача. Л., «Речной транспорт», 1959, с. 231.

**Барышев Н. В.** Некоторые замечания к вопросу об определении густоты сети опробования.— «Разведка недр», 1937, № 4, с. 49—53.

**Берзина А. П., Сотников В. И.** О физико-химических особенностях рудообразующих растворов Сорского месторождения.— В кн.: Минералогическая термометрия и барометрия. Т. 1. М., «Наука» 1968, с. 338—343.

**Богородицкий К. Ф.** Об условиях миграции и химическом составе подземных вод.— В кн.: Геотермические исследования и использование тепла Земли. М., «Наука», 1966, с. 232—239.

**Бернадский В. И.** Об областях охлаждения в земной коре.— В кн.: Записки Гос. гидрологического института. Т. 10, 1933, с. 87—96.

**Герашенко О. А. и др.** Тепловые и температурные измерения. Киев, «Наукова думка», 1965. 198 с.

**Дударев А. Н.** Моделирование высокотемпературных геологических процессов с одновременным исследованием теплообменом в динамических условиях.— «Геол. и геофиз.», 1969, № 3, с. 125—128.

**Дударев А. Н., Сотников В. И.** Мобилизация и перераспределение рудного вещества во влажных средах в термоградиентном поле по экспериментальным и геологическим данным.— В кн.: Физические и физико-химические процессы в динамических рудообразующих системах. Новосибирск, «Наука», 1971, с. 146—165.

**Дударев А. Н., Сотников В. И., Васильева А. И. и др.** Миграция рудных компонентов в искусственно созданном термоградиентном поле (по данным полевого эксперимента).— «Геохимия», 1973, № 9, с. 1316—1327.

**Кобранова В. Н., Лепарская Н. Д.** Определение физических свойств горных пород М., Гостоптехиздат, 1957, с. 165.

**Кононов В. И.** Влияние естественных и искусственных очагов тепла на формирование химического состава подземных вод. М., «Наука», 1965. 146 с.

**Крейтер В. М.** Поиски и разведка полезных ископаемых. М.— Л., Госгеолтехиздат, 1940. 790 с.

**Кропоткин П. Н.** Концентрационная (температурная) зональность и генетическая связь оруденения с интрузиями.— «Сов. геология», 1957, № 58, с. 74—92.

**Малинин С. Д.** К методике эксперимента с гидротермальными растворами, содержащими углекислоту.— В кн.: Экспериментальные исследования в области глубинных процессов. М., изд. АН СССР, 1962, с. 100—115.

**Михеев М. А., Михеева И. М.** Краткий курс теплопередачи. М., Госэнергоиздат, 1960. 105 с.

**Овчинников Л. Н.** Экспериментальные исследования процессов эндогенного рудообразования.— В кн.: Проблема кристаллохимии, минералогии и эндогенного минералообразования. М., «Наука», 1967, с. 81—93.

**Овчинников Л. Н., Шур А. С.** О пористости магнетита и гранита различных генераций.— «Докл. АН СССР», 1955, т. 101, № 1, с. 155—159.

**Овчинников А. М.** Геологические условия гидротермальных растворов.— «Бюлл. МОИП. Отд. геол.» 1957, т. 32, вып. 5, с. 127—144.

**Поспелов Г. Л.** Об «очаговой зоне» земной коры, «магматогенной короне», «ореолах магматизма» и «структурных ассоциациях интрузивов».— «Изв. АН СССР. Сер. геол.», 1959, № 3, с. 19—36.

**Поспелов Г. Л.** Некоторые физические и физико-химические вопросы образования гидротермальных месторождений.— «Геол. и геофиз.», 1963, № 10, с. 20—46.

**Поспелов Г. Л.** Геологические предпосылки к физике рудоконтролирующих флюидопроводников.— «Геол. и геофиз.», 1963, № 3 с. 18—39, № 4 с. 24—42.

**Поспелов Г. Л.** Парадоксы, геологическая сущность и механизмы метасоматоза. Новосибирск, «Наука», 1973. 355 с.

**Смирнов В. И.** О плотности разведочной сети.— «Сов. геология», 1957, № 58, с. 150—162.

Сотников В. И., Берзина А. П., Дударев А. Н. и др. Физико-химические и теплофизические особенности субвулканического гидротермального рудообразования.— В кн.: Тезисы докл. Всесоюзного межвузовского совещания. Ташкент, 1971, с. 200—201.

Сотников В. И., Дударев А. Н. Экспериментальное изучение взаимодействия гранита с водой и раствором  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  в условиях неоднородного температурного поля.— В кн.: Физика и физико-химия рудообразующих процессов. Новосибирск, «Наука», 1971, с. 171—181.

Сыромятников Ф. В. Новый аппарат (экзоклав) для изучения минералов при высокой температуре и большом давлении.— «Докл. АН СССР», 1950, т. 70, № 1, с. 87—89.

Хижняков С. В. Практические расчеты тепловой изоляции промышленного оборудования и трубопроводов. М., «Энергия», 1964, с. 125.

Хитаров Н. И., Лебедев Е. Б. Установка для исследования геохимических процессов, протекающих при повышенных температурах и давлениях в динамических условиях.— В кн.: Экспериментальные исследования в области глубинных процессов. М., изд. АН СССР, 1962, с. 75—90.

Хитаров Н. И. О некоторых гидротермальных экспериментах.— В кн.: Вопросы петрографии и минералогии. М., изд. АН СССР, 1953, с. 191—198.

Хитаров Н. И., Арутюнян Л. А., Малинин С. Д. О возможности миграции молибдена в паровой фазе молибдатных растворов при повышенных температурах.— «Геохимия», 1967, № 2, с. 155—160.

Чернорук С. Г., Казинин Ю. В. и др. Экспериментальное исследование гидротермальной аргиллизации гранитоидов.— В кн.: Проблемы метасоматоза. М., «Недра», 1970, с. 351—361.

Шарапов И. П. Об определении изменчивости и выдержанности месторождений полезных ископаемых.— «Разведка недр», 1952, № 3, с. 19—22.

Шипулин Ф. К. Дайки гранитоидов и некоторые особенности генезиса рудоносных растворов.— В кн.: Петрографические провинции, изверженные и метаморфические породы. М., «Недра», с. 92—113.

Шипулин Ф. К. Интрузия и рудообразование. М., «Наука», 1968. 215 с.

Шлыгин А. Е. О возможности возникновения «замкнутых» систем при формировании гидротермальных месторождений и ореолов околорудных изменений.— В кн.: Метасоматические изменения боковых пород и их роль в рудообразовании. М., «Недра», 1966, с. 37—49.

## **ПРИЛОЖЕНИЯ**



Пример записи в дневнике работ

24/X—1970 г.

Время — 6 ч. 15 мин.

$\Gamma=3,5$        $V=200$        $H_1=705$

$\pm 12 \pm 14$        $I=190A$        $H_2=680$

$\Delta V=+2$        $t=4,3^\circ$

XA	2,6	3,7	2,0	0,7	0,5	0,3	0	0	0	0	0	0
XK	7	7	7	28	35	34	27	29	35	27	23	22

Скважина	$mV/c$					$\tau$ , ч мин	$t$ , $^\circ C$	$mV'$
----------	--------	--	--	--	--	----------------	------------------	-------

Площадка 1

22	0,2/30	0,5/50				6 25	-4,4	1,2
21	0,1/15	0,3/28	0,5/40	0,8/64	1,0/115	6 30	-4,3	1,5
20	0,1/28	0,2/40	0,5/60	0,8/100		6 35	-4,6	1,1
18	0,1/17	0,2/30	0,5/56	0,8/105		6 45	-4,9	1,2
24	0,1/30	0,2/47	0,5/80	0,7/120	0,8/150	6 50	-4,8	1,0
25	0,1/19	0,2/30	0,5/48	0,8/85		6 55	-4,9	1,3
26	0,1/25	0,2/35	0,5/60	0,8/110	1/127	7 05	-4,9	1,2
27	0,1/22	0,2/40	0,5/74	0,8/157		7 10	-4,5	0,9
1	0,1/20	0,2/28	0,5/48	0,8/85	1,0/120	7 15	-4,5	1,4
2	0,1/28	0,2/40	0,5/59	0,8/115	1,0/165	7 25	-4,8	1,2
3	0,1/22	0,2/28	0,5/45	0,8/75	1,0/113	7 30	-4,4	1,4
4	0,1/8	0,2/15	0,5/21	0,8/28	1,0/40	7 35	-4,0	1,4
12	0,1/4	0,2/8	0,5/16	0,8/30	1,0/40	8 00	-4,2	2,3
3	0,1/8	0,2/	0,5/22	0,8/35	1,0/50	8 10	-4,0	2,1
4	0,1/18	0,2/37	0,5/60	0,9/120		8 15	-3,8	1,3

Площадка 2

11	0,1/59	0,3/100	0,5/135			8 15	-4,0	0,9
10	0,1/80	0,2/100	0,3/110	0,5/154		8 20	-4,5	0,9
9	0,1/40	0,2/75	0,3/85	0,5/110		8 25	-4,8	1,0
8	0,1/40	0,2/62	0,3/75	0,5/110		8 30	-5,2	0,8
7	0,5/18	1,0/31	1,5/45	2,0/63	2,5/84	8 35	-6,0	0,5
2	0,1/15	0,2/30	0,3/75	0,5/90		9 20	-12,1	0,6

Примечание. Цифры 0,2/30; 0,5/50 означают 0,2; 0,5 —  $mV$  по гальванометру; 30 50 — время (с) достижения этих показателей при измерении тепловых потоков.

$\Gamma$  — показания газового счетчика;  $\pm 12$ ,  $\pm 14$  — показания U-образного манометра,  $\Delta V$  — показания манометра,  $V$  — напряжение питания нагревателя,  $I$  — сила тока,  $A$ ,  $t$  — температура воздуха,  $^\circ C$ ,  $\tau$  — время суток,  $mV'$  — максимальный нагрев калориметра, XA — хромель-алюмелевая термопара скв. 15, XK — хромель-копелевая термопара скв. 17,  $H_1$  — нагреватель в скв. 6 пл. 1,  $H_2$  — нагреватель в скв. 5 пл. 1.

Максимальный нагрев в скважине был достигнут 17/X 1970 в 11—00, термопара в скв. 6 показала 35,2  $mV$ , что соответствует 710 $^\circ C$ .

Приложение II

Распределение рудных элементов по зонам нагрева, площадка 1

Параметры	Температура, $^\circ C$			
	<30, n=14	30—50, n=66	50—100, n=38	>100, n=48
1	2	3	4	5

Медь

1	0,00619	0,00499	0,00499	0,00319
2	0,0000042	0,0000014	0,0000049	0,0000026
3	0,00206	0,00118	0,00221	0,00161
4	33,24	23,69	44,29	50,42
5	-0,29	0,49	0,24	2,01

1	2	3	4	5
6	-0,64	0,73	-0,93	5,87
7	0,00055	0,00015	0,00036	0,00023
8	6,94	2,18	5,99	6,32

**Никель**

1	0,00651	0,00469	0,00527	0,00512
2	0,0000032	0,0000030	0,0000034	0,0000025
3	0,00178	0,00173	0,00185	0,00158
4	27,32	36,85	35,02	30,89
5	1,73	1,33	0,23	0,36
6	4,02	3,00	-0,46	-0,36
7	0,00048	0,00021	0,00029	0,00023

**Молибден**

1	0,000151	0,000182	0,000170	0,000208
2	0	0	0	0
3	0,00011	0,000136	0,000105	0,000121
4	73,57	74,15	62,12	58,17
5	2,15	3,39	1,42	1,50
6	4,01	13,19	1,50	1,50
7	0,000029	0,000017	0,000017	0,000017
8	20,06	9,35	9,48	7,69

**Цинк**

1	0,00508	0,00457	0,00415	0,00424
2	0,0000008	0,0000017	0,0000011	0,0000018
3	0,00090	0,00132	0,00103	0,00134
4	17,77	28,8-	24,83	31,50
5	0,03	1,46	0,16	2,10
6	-0,05	3,69	-1,24	5,88
7	0,00024	0,00016	0,00017	0,00019
8	3,46	2,7	3,02	3,52

**Кобальт**

1	0,00141	0,00127	0,00125	0,00113
2	0	0,0000003	0,0000002	0,0000001
3	0,00022	0,00051	0,000396	0,00038
4	15,54	40,11	31,72	34,17
5	-0,29	2,60	0,37	1,11
6	-0,69	8,72	-0,29	1,79
7	0,00006	0,00006	0,00006	0,00006
8	3,01	4,01	3,98	3,87

**Свинец**

1	0,00111	0,00096	0,00103	0,00133
2	0,0000002	0,0000003	0,0000002	0,0000001
3	0,00046	0,00053	0,00048	0,00032
4	41,52	55,11	46,59	24,24
5	1,29	-0,24	-0,43	0,72 <sub>2</sub>
6	1,63	-0,03	0,44	0,48
7	0,00012	0,00006	0,00008	0,00005
8	9,10	6,08	6,40	2,61

**Сумма рудных (г/т)**

204,5	166,2	168,6	152,2
-------	-------	-------	-------

Примечание. Здесь и далее 1--8 — статистики распределения: 1 — среднее; 2 — дисперсия; 3 — основное отклонение; 4 — изменчивость; 5 — косость; 6 — крутость; 7 — ошибка среднего; 8 — ошибка изменчивости. Сумма рудных до нагревания равна 134,4 г/т, после нагревания — 140,5 г/т.

## Распределение рудных элементов по зонам нагрева площадки 2

Параметр	Температура, С			
	<30, n=17	30—50, n=45	50—100, n=80	>100, n=32
1	2	3	4	5

## Медь

1	0,00719	0,00641	0,00772	0,00596
2	0,0000032	0,0000083	0,0000115	0,0000056
3	0,00178	0,00289	0,00339	0,00237
4	24,78	45,04	43,99	39,72
5	0,61	1,25	1,27	0,81
6	1,51	1,62	3,54	—0,04
7	0,00043	0,00043	0,00062	0,00042
8	4,50	5,63	6,69	5,69

## Кобальт

1	0,00173	0,00135	0,00167	0,00126
2	0,0000001	0,0000005	0,0000007	0,0000008
3	0,00037	0,00070	0,00083	0,00090
4	21,15	52,05	49,77	71,90
5	0,72	0,80	0,48	0,31
6	—0,85	0,27	—0,27	0,42
7	0,00009	0,00010	0,00015	0,00016
8	3,77	6,81	7,86	12,82

## Свинец

1	0,00105	0,00143	0,00138	0,00138
2	0	0,0000005	0,0000002	0,0000003
3	0,00022	0,00068	0,00049	0,00057
4	20,89	47,64	35,47	41,35
5	2,13	2,67	0,78	2,89
6	5,10	9,17	—0,53	10,85
7	0,00005	0,00010	0,00009	0,00010
8	3,74	6,06	5,12	5,99

## Никель

1	0,00752	0,00593	0,00676	0,00530
2	0,0000035	0,0000050	0,0000081	0,0000046
3	0,00186	0,00224	0,00284	0,00215
4	24,77	37,73	41,98	40,63
5	1,34	0,04	0,42	0,64
6	1,93	—0,82	0,41	—0,48
7	0,00045	0,00033	0,00052	0,00038
8	4,50	4,51	6,30	5,86

1	2	3	4	5
<b>Молибден</b>				
1	0,000159	0,000238	0,000247	0,000214
2	0,0	0,0	0,0	0,0
3	0,000118	0,000164	0,000190	0,000135
4	74,02	68,70	77,12	62,93
5	0,97	1,84	2,32	1,80
6	-0,61	4,04	6,09	3,55
7	0,000028	0,000024	0,000035	0,000024
8	18,38	10,09	14,73	10,53
<b>Цинк</b>				
1	0,00447	0,00397	0,00432	0,00407
2	0,0000006	0,0000007	0,0000011	0,0000012
3	0,00078	0,00084	0,00103	0,00111
4	17,53	21,15	23,89	27,39
5	-0,06	-0,33	0,26	0,49
6	-0,88	-0,41	0,09	-0,71
7	0,00019	0,00013	0,00019	0,00020
8	3,09	2,33	3,26	3,67
<b>Сумма рудных (г/т)</b>				
	221,2	193,3	221,0	181,8

## Приложение III

## Распределение рудных элементов на площадке 1, зона нагрева 1 (&lt;30°C)

Параметр	Уровень глубины, м		
	0—0,50, n=8	0,50—1,00, n=4	1,0—1,5, n=2
1	2	3	4
<b>Медь</b>			
1	0,000085	0,000168	0,000385
2	0,0	0,0000004	0,0000132
3	0,000007	0,000019	0,000115
4	8,32	11,46	29,87
5	1,06	-0,27	0,0
6	-0,25	-1,43	-2,00
7	0,000003	0,000010	0,000081
8	2,09	4,11	16,21
<b>Молибден</b>			
1	0,00759	0,00363	0,00575
2	0,0000014	0,0000012	0,0000006
3	0,00118	0,00108	0,00075
4	15,54	29,86	13,04

1	2	3	4
5	0,22	0,32	0,00
6	-1,21	-1,08	-2,0
7	0,00042	0,00054	0,00053
8	3,98	11,46	6,63
<b>Свинец</b>			
1	0,00081	0,00163	0,00130
2	0,0	0,0000002	0,0
3	0,00019	0,00046	0,00010
4	23,38	28,33	7,69
5	0,69	0,96	0,0
6	-0,39	-0,79	-2,0
7	0,00007	0,00023	0,00007
8	6,16	10,79	3,87
<b>Никель</b>			
1	0,00614	0,00578	0,00950
2	0,0000001	0,0000025	0,0000063
3	0,00033	0,00157	0,00250
4	5,40	27,11	26,32
5	-0,63	-0,24	0,0
6	-0,74	-1,59	-2,0
7	0,00011	0,00078	0,0018
8	1,35	10,27	14,04
<b>Кобальт</b>			
1	0,00141	0,00125	0,00150
2	0,0	0,0000001	0,0
3	0,000145	0,00023	0,00010
4	10,28	18,33	5,88
5	-0,95	0,49	0,0
6	0,12	-1,24	-2,0
7	0,00005	0,00011	0,00007
8	2,59	6,69	2,95
<b>Цинк</b>			
1	0,00545	0,00448	0,00480
2	0,0000004	0,0000006	0,0000014
3	0,00066	0,00076	0,00120
4	12,14	16,97	25,00
5	1,54	-0,06	0,0
6	0,92	-1,66	-2,0
7	0,00023	0,00038	0,00084
8	3,08	6,17	13,26
<b>Сумма рудных (г/т)</b>			
	214,85	169,38	234,35

## Распределение рудных элементов на площадке 1, зона нагрева 3 (50—100°C)

Параметр	Уровень глубины, м						
	0—0,5, n=9	0,5—1,0, n=6	1,0—1,5, n=5	1,5—2,0, n=4	2,0—2,5, n=5	2,5—3,0, n=5	3,0—3,5, n=3
1	2	3	4	5	6	7	8
<b>Молибден</b>							
1	0,000083	0,000132	0,000254	0,000238	0,000170	0,000176	0,000186
2	0	0,0000005	0,0000140	0,0000017	0,0000284	0,0000029	0,0000004
3	0,000008	0,000023	0,000118	0,00004	0,000168	0,000055	0,000019
4	9,79	17,77	46,62	17,46	99,06	31,04	10,10
5	0,54	1,28	0,14	0,49	1,36	0,70	—0,71
6	—0,17	0,19	—1,57	—1,37	0,05	—0,92	—1,50
7	0,000003	0,000009	0,00005	0,00002	0,00008	0,000024	0,000011
8	2,33	5,29	17,65	6,36	53,92	10,72	4,17
<b>Медь</b>							
1	0,00774	0,00412	0,00642	0,00450	0,00360	0,00366	0,00230
2	0,0000012	0,0000002	0,0000012	0,0000038	0,0000038	0,0000009	0,0000001
3	0,00110	0,000045	0,00108	0,00162	0,00196	0,00097	0,000245
4	14,21	10,90	16,90	36,00	54,43	26,52	10,65
5	1,24	0,49	2,78	—0,17	1,39	1,16	—
6	0,54	—0,89	6,19	—1,16	0,71	1,46	—
7	0,00015	0,00006	0,00019	0,00009	0,00006	0,00021	—
8	8,46	3,49	13,83	5,73	4,01	11,98	—
<b>Цинк</b>							
1	0,00536	0,00500	0,00457	0,00448	0,00446	0,00384	—
2	0,0000003	0,0000003	0,0000011	0,0000028	0,0000032	0,0000011	—
3	0,00050	0,00057	0,00106	0,00167	0,00179	0,00104	—
4	9,41	11,35	23,13	37,34	40,22	27,12	—
5	0,14	—0,86	—0,15	+2,07	1,88	2,08	—
6	—0,63	1,36	—0,89	3,88	2,76	4,30	—
7	0,00018	0,00017	0,00030	0,00048	0,00054	0,00030	—
8	2,37	2,45	4,97	8,62	9,86	5,93	—

1	2	3	4	5	6	7	8
<b>Никель</b>							
1	0,00531	0,00521	0,00404	0,00416	0,00404	0,00558	—
2	0,0000012	0,0000009	0,0000016	0,0000025	0,0000004	0,0000080	—
3	0,00110	0,00093	0,00126	0,00158	0,00061	0,00284	—
4	20,76	17,81	31,09	37,97	15,06	50,83	—
5	0,57	1,17	—0,88	1,16	0,62	—0,93	—
6	—0,47	0,82	2,45	2,83	—0,68	—0,93	—
7	0,00039	0,00028	0,00036	0,00046	0,00018	0,00082	—
8	5,41	3,92	6,93	8,79	3,28	12,78	—
<b>Кобальт</b>							
1	0,00135	0,00123	0,00128	0,00113	0,00111	0,00154	—
2	0,0000002	0	0,0000005	0,0000001	0	0,0000006	—
3	0,00042	0,00019	0,00069	0,00029	0,00020	0,00075	—
4	30,99	15,96	53,88	26,31	18,22	48,43	—
5	—0,08	—1,01	—1,62	0,13	0,13	1,12	—
6	—1,18	0,74	2,80	—0,47	—1,49	1,25	—
7	0,00038	0,00020	0,00027	0,00032	0,00026	0,00037	—
8	4,25	3,08	4,25	4,67	3,88	6,07	—
<b>Свинец</b>							
1	0,00079	0,00146	0,00106	0,00053	0,00052	0,00134	—
2	0	0,0000001	0,0000001	0,0000002	0,0000002	0,0000002	—
3	0,000127	0,00031	0,00026	0,00047	0,00048	0,00042	—
4	16,11	20,86	24,54	88,39	92,30	30,95	—
5	—0,49	0,81	—1,79	—0,14	—0,12	0,64	—
6	—1,47	0,77	3,39	—1,84	—1,90	—0,95	—
7	0,00004	0,00009	0,00008	0,00014	0,00014	0,00012	—
8	4,13	4,64	5,30	28,88	32,36	6,89	—

## Распределение рудных элементов на площадке 1, зона нагрева 2 (30—50°C)

Параметр	Уровень, глубины, м						
	0—0,5, n=8	0,5—1,0, n=11	1,0—1,5, n=12	1,5—2,0, n=12	2,0—2,5, n=11	2,5—3,0, n=12	3,0—3,5
1	2	3	4	5	6	7	8
<b>Молибден</b>							
1	0,000075	0,000221	0,000244	0,000128	0,000160	0,000230	—
2	0,0000002	0,0000415	0,0000297	0,0000019	0,0000034	0,0000096	—
3	0,000015	0,00020	0,000172	0,000029	0,000058	0,000098	—
4	20,0	92,22	70,53	23,34	36,54	42,60	—
5	0,0	2,61	2,75	—0,51	1,39	0,52	—
6	—0,81	5,30	6,07	0,27	0,67	0,15	—
7	0,000005	0,00006	0,00005	0,000009	0,000018	0,000028	—
8	5,19	31,31	20,33	5,02	8,77	10,16	—
<b>Медь</b>							
1	0,00655	0,00458	0,00460	0,00513	0,00486	0,00468	—
2	0,0000012	0,0000004	0,0000009	0,0000013	0,0000007	0,0000017	—
3	0,00108	0,00065	0,00092	0,00112	0,00086	0,00129	—
4	16,57	14,17	20,03	21,86	17,65	27,69	—
5	0,34	0,83	—0,39	—0,44	0,57	—0,06	0
6	—1,38	0,90	—1,79	—1,00	—0,56	—1,49	—1,50
7	0,00037	0,00018	0,00048	0,00081	0,00088	0,00043	0,00014
8	3,42	3,18	5,49	14,28	21,72	8,96	4,40
<b>Свинец</b>							
1	0,00089	0,00122	0,00148	0,00070	0,00040	0,00131	0,00123
2	0	0	0,0000002	0,0000006	0,0000001	0,0000001	0
3	0,000071	0,000146	0,00042	0,00076	0,00035	0,00028	0,00005
4	8,52	12,02	28,15	107,85	88,04	21,09	3,82
5	0,0	0,03	—0,01	0,39	0,03	0,66	0,71
6	—1,36	—1,31	—1,52	—1,49	—0,44	—1,50	—1,50
7	0,00003	0,00006	0,00019	0,00038	0,00016	0,00012	0,00003
8	2,02	3,52	9,58	69,55	44,46	6,96	1,56



1	2	3	4	5	6	7	8
<b>Никель</b>							
1	0,00763	0,00423	0,00454	0,00610	0,00358	0,00500	0,00467
2	0,0000010	0,0	0,0000023	0,0000013	0,0000020	0,0000013	0,0000002
3	0,00098	0,000149	0,00153	0,00115	0,00141	0,00114	0,00047
4	12,79	3,52	33,74	18,91	39,52	22,80	10,10
5	0,27	-0,32	-0,19	0,84	-0,26	0,61	-0,70
6	-1,60	-0,28	-1,59	-0,92	-1,31	-0,50	-1,50
7	0,00033	0,00006	0,00068	0,00058	0,00063	0,00051	0,00027
8	3,07	1,02	11,82	6,92	14,32	7,58	4,16
<b>Кобальт</b>							
1	0,00171	0,00108	0,00114	0,00128	0,00100	0,00112	0,00120
2	0,0000001	0,0	0,0000001	0,0	0,0000001	0,0000002	0,0
3	0,00032	0,00007	0,00032	0,00008	0,00035	0,00039	0,00022
4	18,57	6,34	28,07	6,50	35,21	34,99	18,0
5	-0,03	0,23	0,15	0,49	0,74	-0,33	0,59
6	-1,16	-0,89	-1,33	-1,37	-1,06	-1,75	-1,50
7	0,00011	0,00003	0,00014	0,00004	0,00016	0,00017	0,00012
8	4,53	1,84	9,55	2,31	12,44	12,35	7,58
<b>Цинк</b>							
1	0,00504	0,00492	0,00290	0,00495	0,00374	0,00350	—
2	0,0000005	0,0000004	0,0000001	0,0000004	0,0000005	0,0000002	—
3	0,00069	0,00061	0,00037	0,00064	0,0000005	0,0000002	—
4	13,61	12,34	12,90	12,89	0,00067	0,00045	—
5	-0,87	0,32	0,34	-0,23	17,94	12,78	—
6	0,47	-0,40	-1,15	-0,99	1,04	0,0	—
7	0,00023	0,00025	0,00017	0,00032	-0,21	-1,75	—
8	3,27	3,62	4,15	4,63	0,00030	0,00020	—
					5,85	4,11	—

## Распределение рудных элементов на площадке 1, зона нагрева 4 (100°С)

Параметр	Уровень глубины, м						
	0—0,5, n=8	0,5—1,0, n=6	1,0—1,5, n=6	1,5—2,0, n=9	2,0—2,5, n=9	2,5—3,0, n=8	3,0—3,5, n=7
1	2	3	4	5	6	7	8
<b>Молибден</b>							
1	0,000085	0,000142	0,000394	0,000306	0,000143	0,000126	0,000165
2	0,0	0,0000008	0,0000121	0,0000108	0,0000009	0,0000008	0,0000004
3	0,000005	0,000029	0,000110	0,000104	0,000029	0,000028	0,000021
4	5,88	20,55	27,99	34,08	20,80	22,02	12,43
5	0,0	-0,57	0,37	0,51	0,53	0,49	0,19
6	-2,00	-0,76	-0,63	-1,13	0,70	-0,63	-1,14
7	0,000004	0,000012	0,00004	0,00004	0,000010	0,000010	0,000008
8	2,95	6,18	7,53	8,92	5,11	5,77	3,37
<b>Медь</b>							
1	0,00900	0,00440	0,00287	0,00284	0,00227	0,00248	0,00313
2	0,0000010	0,0000002	0,0000018	0,0000007	0,0000008	0,0	0,0000006
3	0,00100	0,00041	0,00134	0,00083	0,000902	0,00022	0,00078
4	11,11	9,37	46,62	29,28	39,84	8,98	24,86
5	0,0	0,89	0,58	0,04	-0,66	-0,85	1,22
6	-2,0	-0,33	-0,90	-1,34	-1,50	0,25	0,25
7	0,00070	0,00016	0,00047	0,00027	0,00030	0,00079	0,00020
8	5,62	2,73	13,96	7,47	10,78	2,26	7,04
<b>Свинец</b>							
1	0,00090	0,00115	0,00151	0,00129	0,00145	0,00126	0,00133
2	0,0	0,0	0,0000001	0,0000002	0,0000001	0,0	0,0
3	0,00010	0,00017	0,000333	0,00041	0,00035	0,00016	0,00009
4	11,11	14,85	21,79	31,98	23,82	13,09	6,63
5	0,0	0,0	0,22	0,84	0,34	-0,72	-0,58
6	-2,00	-1,27	-0,97	-0,73	0,79	-1,17	-1,45
7	0,00007	0,00007	0,00012	0,00014	0,00012	0,00006	0,00003
8	5,62	4,38	5,69	8,27	5,93	3,33	1,78

1	2	3	4	5	6	7	8
<b>Никель</b>							
1	0,00775	0,00437	0,00525	0,00524	0,00547	0,00396	0,00519
2	0,0000001	0,0000003	0,0000018	0,0000047	0,0000032	0,0000013	0,0000002
3	0,00025	0,00051	0,00135	0,00216	0,00178	0,00114	0,00044
4	3,23	11,58	25,80	41,28	32,48	28,83	8,46
5	0,0	0,15	-0,76	0,39	-0,42	1,02	0,38
6	-2,0	-1,58	-0,69	-1,05	-0,69	0,44	-0,40
7	0,00018	0,00021	0,00048	0,00072	0,00059	0,00040	0,00017
8	1,61	3,39	6,87	11,27	8,43	7,78	2,28
<b>Кобальт</b>							
1	0,00135	0,00110	0,00110	0,00122	0,00111	0,00098	0,00123
2	0,0000002	0	0,0000001	0,0000004	0,0000002	0,0000001	0,0
3	0,00045	0,00014	0,00028	0,00065	0,00040	0,00024	0,00015
4	33,33	12,86	25,31	53,27	36,61	24,68	13,15
5	0,0	1,41	0,35	0,74	-0,35	1,96	0,81
6	-2,0	0,50	-0,82	-0,84	-1,33	2,39	-0,91
7	0,00032	0,00006	0,00010	0,00021	0,00014	0,00009	0,00006
8	18,43	3,77	6,72	15,72	9,72	6,54	3,58
<b>Цинк</b>							
1	0,00360	0,00453	0,00454	0,00489	0,00428	0,00394	—
2	0	0,0000002	0,0000021	0,0000046	0,0000005	0,0000012	—
3	0,00010	0,00043	0,0014	0,00214	0,00067	0,00104	—
4	2,78	9,50	31,63	43,69	15,69	26,51	—
5	-0,0	-0,40	1,59	1,32	0,57	0,83	—
6	-2,0	-1,35	1,35	0,85	-1,07	-0,69	—
7	0,00007	0,00018	0,00051	0,00071	0,00022	0,00037	—
8	1,39	2,77	8,66	12,11	3,79	7,08	—

## Распределение рудных элементов в блоке сиенито-диоритов

Параметр	До нагрева, n=139	После нагрева, n=241	Параметр	До нагрева, n=139	После нагрева, n=241
<b>Свинец</b>			<b>Никель</b>		
1	0,00335	0,00329	1	0,00081	0,00096
2	0,0000060	0,0000015	2	0,0000002	0,0000004
3	0,00246	0,00339	3	0,00065	0,00043
4	73,45	103,38	4	52,77	67,98
5	2,09	5,26	5	1,98	7,16
6	6,29	39,06	6	6,56	8,06
7	0,00021	0,00022	7	0,000036	0,00004
8	6,35	8,34	8	3,95	4,29
<b>Кобальт</b>			<b>Медь</b>		
1	0,00144	0,00145	1	0,00508	0,00450
2	0,0000007	0,0000009	2	0,0000009	0,0000005
3	0,00084	0,00096	3	0,00317	0,00234
4	59,49	66,37	4	61,36	51,99
5	5,85	4,75	5	2,15	0,50
6	50,10	40,37	6	12,48	-0,22
7	0,00007	0,00006	7	0,00026	0,00015
8	4,55	4,14	8	4,87	2,93
<b>Цинк</b>			<b>Молибден</b>		
1	0,00446	0,00357	1	0,000303	0,000284
2	0,0000021	0,0000006	2	0,0000003	0
3	0,00144	0,00125	3	0,00050	0,000139
4	32,38	34,92	4	166,68	49,03
5	0,95	0,06	5	9,29	1,83
6	1,67	-0,28	6	92,44	3,85
7	0,00012	0,00008	7	0,000043	0,000009
8	2,14	1,77	8	25,59	2,71

## Распределение рудных элементов в областях нагрева блока сениито-диоритов

Параметр	До нагревания				После нагревания			
	Область нагрева, число проб				Область нагрева, число проб			
	I, n=50	II, n=16	III, n=16	IV, n=33	I, n=47	II, n=57	III, n=34	IV, n=52
1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>Цинк</b>								
1	0,00406	0,00488	0,00404	0,00519	0,00276	0,00372	0,00406	0,00433
2	0,0000006	0,0000002	0,0000006	0,0000005	0,0000011	0,0000014	0,0000007	0,0000011
3	0,00127	0,00178	0,00075	0,000159	0,00106	0,00118	0,00085	0,00107
4	31,38	36,47	18,44	30,70	38,50	31,80	20,94	24,68
5	1,53	0,62	0,53	0,06	1,41	-0,30	0,05	-0,09
6	2,19	-0,82	-0,84	1,79	3,94	1,09	-0,57	-0,15
7	0,00018	0,00063	0,00018	0,00028	0,00015	0,00016	0,00015	0,00015
8	3,43	10,26	3,36	4,12	4,52	3,27	2,65	2,56
<b>Никель</b>								
1	0,00062	0,00095	0,00068	0,001030	0,00065	0,00096	0,00108	0,00106
2	0,0000001	0,0000003	0,0000001	0,0000004	0,0000002	0,0000001	0,0000001	0,0000015
3	0,00025	0,000553	0,00029	0,00059	0,00041	0,00037	0,00029	0,001120
4	40,64	56,59	42,88	57,28	63,15	38,76	27,22	105,33
5	0,29	0,25	1,74	1,87	0,71	-0,02	0,73	6,06
6	-0,70	-0,74	3,55	3,25	0,02	0,54	1,07	38,56
7	0,000036	0,00018	0,000073	0,00010	0,00006	0,00005	0,00005	0,00015
8	4,68	18,12	8,86	9,07	8,73	4,14	3,53	18,53
<b>Кобальт</b>								
1	0,00118	0,00172	0,00177	0,00169	0,00131	0,00111	0,00206	0,00151
2	0,0000001	0,0000005	0,0000007	0,0000004	0,0000025	0,0000002	0,0000011	0,0000003
3	0,00037	0,00070	0,00193	0,00063	0,00158	0,00043	0,00104	0,00056
4	31,56	41,01	109,29	37,34	120,59	38,71	50,68	36,72
5	0,07	0,29	3,53	0,94	4,91	0,11	2,12	1,26

6	-1,17	-1,44	10,70	0,79	27,13	-0,34	5,55	3,93
7	0,00005	0,00024	0,00048	0,00011	0,00023	0,00006	0,00018	0,00008
8	3,45	11,85	35,56	5,19	24,59	4,13	7,56	4,05

**Свинец**

1	0,00247	0,00408	0,00236	0,00516	0,00141	0,00378	0,00339	0,00464
2	0,0000062	0,0000067	0,0000009	0,0000081	0,0000018	0,0000125	0,0000020	0,0000288
3	0,00249	0,00216	0,00093	0,00284	0,00134	0,00353	0,00140	0,00537
4	101,35	52,95	39,39	55,06	94,85	93,50	41,41	115,60
5	2,49	0,25	1,25	2,04	2,15	4,04	0,63	4,06
6	6,38	-0,11	0,83	4,73	4,59	20,63	-0,07	18,37
7	0,00035	0,00076	0,00023	0,00049	0,0019	0,00047	0,00024	0,00074
8	17,71	16,54	7,97	5,89	16,37	14,52	5,82	21,72

**Медь**

1	0,00456	0,00769	0,00616	0,00549	0,00417	0,00453	0,00672	0,00378
2	0,0000074	0,0000587	0,0000060	0,0000004	0,0000044	0,0000051	0,0000045	0,0000042
3	0,00273	0,00716	0,00223	0,00185	0,00210	0,00225	0,00211	0,00206
4	59,76	99,65	36,29	33,74	50,43	49,68	31,42	54,51
5	0,06	1,48	1,11	0,32	0,43	0,51	0,34	0,63
6	-1,39	1,28	-0,70	-1,18	-0,07	0,03	-1,21	0,21
7	0,00038	0,00270	0,00055	0,00032	0,00031	0,00029	0,00036	0,00029
8	7,82	43,04	7,21	4,60	6,39	5,69	4,17	6,75

**Молибден**

1	0,000302	0,000221	0,000279	0,000381	0,000346	0,00026	0,000271	0,000283
2	0,0000001	0	0	0,0000009	0	0	0	0
3	0,000333	0,000073	0,000112	0,000944	0,000201	0,000129	0,000124	0,000096
4	110,05	33,16	40,02	247,48	58,07	49,62	45,91	34,05
5	5,75	0,67	0,66	5,45	0,84	2,92	2,51	1,43
6	25,06	0,86	-1,27	27,82	-0,47	10,50	7,49	3,50
7	0,000047	0,000026	0,000028	0,00016	0,000029	0,000017	0,000021	0,000013
8	20,36	9,16	8,13	110,88	7,75	5,68	6,64	3,70

Примечание. I — IV — области нагрева: I — < 50 °С; II — 50 — 100; III — 100 — 300; IV — > 300 С.

## Распределение рудных элементов в блоке сиенито-диоритов (до нагривания)

Параметр	Уровень глубины (м); число проб								
	0,25, n=21	0,50, n=21	0,75, n=20	1,0, n=20	1,25, n=18	1,50, n=18	1,75, n=9	2,0, n=9	2,25, n=3
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>Медь</b>									
1	0,00564	0,00520	0,00499	0,00447	0,00487	0,00504	0,00656	0,00433	0,00433
2	0,0000069	0,0000067	0,0000060	0,0000065	0,0000075	0,0000072	0,0000064	0,0000064	0,0000042
3	0,00243	0,00259	0,00223	0,00235	0,00274	0,00278	0,00738	0,00254	0,00205
4	42,99	49,91	44,73	52,56	56,29	55,08	112,52	58,58	47,42
5	-0,30	-0,27	-0,10	-0,02	0,36	0,37	1,92	0,85	0,24
6	-1,12	-1,12	-1,06	-1,15	-1,01	-1,12	2,46	0,27	-1,50
7	0,00053	0,00056	0,00049	0,00052	0,00065	0,00065	0,00250	0,00085	0,0012
8	7,76	9,43	8,37	10,36	11,99	11,63	49,85	17,93	23,31
<b>Молибден</b>									
1	0,000242	0,000271	0,000370	0,000232	0,000275	0,000574	0,000214	0,000189	0,000160
2	0	0	0,0000002	0	0	0,0000006	0	0	0
3	0,000077	0,000082	0,000496	0,000098	0,000114	0,001247	0,000088	0,000041	0,000065
4	31,92	30,41	134,22	42,42	41,57	217,18	40,07	21,53	40,50
5	0,54	1,02	3,92	1,35	1,16	3,83	0,82	0,75	0,59
6	1,15	0,56	13,93	1,54	0,40	12,83	-0,66	-0,60	-1,50
7	0,000017	0,000018	0,000111	0,000022	0,000027	0,000294	0,000029	0,000014	0,000037
8	5,40	5,11	45,52	7,82	8,04	116,92	11,19	5,30	19,05
<b>Свинец</b>									
1	0,00321	0,00318	0,00479	0,00332	0,00322	0,00325	0,00290	0,00253	0,00115
2	0,00000024	0,0000030	0,0000117	0,0000059	0,0000081	0,0000071	0,0000022	0,0000017	0,0000004
3	0,00154	0,00174	0,00342	0,00243	0,00284	0,00267	0,00149	0,00129	0,00061
4	47,97	54,58	71,42	73,35	88,23	82,05	51,36	51,02	52,80
5	1,13	0,92	1,69	2,16	1,75	1,87	-0,26	-0,28	0,69

6	1,37	0,60	3,15	5,38	2,76	3,77	-1,12	-0,89	-1,50
7	0,00034	0,00038	0,00076	0,00054	0,00067	0,00063	0,00050	0,00043	0,00035
8	8,95	10,64	10,05	16,71	23,51	20,95	14,96	14,83	26,90

**Кобальт**

1	0,00123	0,00140	0,00149	0,00185	0,00143	0,00145	0,00126	0,00127	0,00096
2	0,0000001	0,0000002	0,0000005	0,0000033	0,0000003	0,0000003	0,0000001	0,0000001	0
3	0,00034	0,00043	0,00070	0,00181	0,00050	0,00050	0,000338	0,00034	0,000119
4	27,21	30,51	47,33	97,48	35,32	34,76	26,74	26,67	12,35
5	0,18	0,17	1,26	3,33	0,19	0,01	-0,12	-0,44	-0,21
6	-0,52	-0,68	1,27	10,79	-0,17	-0,19	-1,34	-1,60	-1,50
7	0,000073	0,000093	0,00016	0,00040	0,00012	0,00012	0,00011	0,00011	0,00007
8	4,50	5,15	9,00	26,25	6,58	6,54	6,74	6,72	5,12

**Никель**

1	0,00090	0,00092	0,00077	0,00080	0,00078	0,00084	0,00061	0,00077	0,00064
2	0,0000003	0,0000003	0,0000001	0,0000002	0,0000002	0,0000001	0	0,0000001	0
3	0,00053	0,00058	0,00036	0,00039	0,0040	0,00032	0,00011	0,00033	0,000160
4	59,24	63,06	47,23	49,61	51,66	37,96	17,81	42,74	25,20
5	2,46	2,02	0,90	0,94	0,09	0,50	-0,91	1,56	0,61
6	6,97	4,30	0,00	-0,26	-0,65	-0,184	0,22	1,80	-1,50
7	0,00012	0,00013	0,00008	0,00009	0,00009	0,00007	0,00004	0,00011	0,00009
8	11,93	13,04	8,98	9,58	10,66	7,18	4,33	11,77	10,93

**Цинк**

1	0,00510	0,00450	0,00455	0,00457	0,00422	0,00429	0,00397	0,00380	0,00353
2	0,0000030	0,0000018	0,0000014	0,0000017	0,0000011	0,0000033	0,0000022	0,0000007	0,0000005
3	0,00174	0,00133	0,00118	0,00131	0,00104	0,00182	0,00148	0,00085	0,00070
4	34,16	28,93	26,04	28,64	24,58	42,50	37,34	22,40	19,19
5	1,13	1,00	0,64	0,73	0,14	0,44	1,75	0,23	-0,34
6	0,23	1,28	1,14	0,29	-1,24	1,08	2,16	-1,33	-1,50
7	0,0004	0,0003	0,00026	0,0003	0,0002	0,0004	0,0005	0,0003	0,0004
8	5,85	4,82	4,39	4,89	4,34	8,27	9,95	5,54	8,45



## Распределение рудных элементов в блоке сиенито-диоритов после нагревания

Пара-метр	Уровень глубины (м), число проб								
	0,25, n=28	0,50, n=19	0,75, n=31	1,0, n=22	1,25, n=63	1,50, n=23	1,75, n=38	2,0, n=10	2,25, n=7
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>Медь</b>									
1	0,00466	0,00476	0,00474	0,00363	0,00514	0,00348	0,00453	0,00455	0,00307
2	0,0000062	0,0000061	0,0000030	0,0000049	0,0000060	0,0000035	0,0000056	0,0000064	0,0000010
3	0,00249	0,00246	0,00175	0,00222	0,00244	0,00188	0,00237	0,00233	0,00102
4	53,41	51,69	36,81	61,24	47,55	57,97	52,36	51,2	33,05
5	0,71	0,15	-0,14	0,84	0,42	0,71	0,39	0,51	-0,70
6	-0,18	-0,60	-0,23	0,73	-0,69	-0,31	-0,16	-0,48	-0,14
7	0,00046	0,00056	0,00031	0,00044	0,00031	0,00039	0,00038	0,00074	0,00038
8	8,95	10,39	5,27	12,21	5,10	11,06	7,47	14,13	9,75
<b>Молибден</b>									
1	0,000264	0,000305	0,000273	0,000278	0,000284	0,000283	0,000314	0,000288	0,000217
2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3	0,000127	0,000160	0,000103	0,0000107	0,000151	0,000164	0,000154	0,000097	0,000056
4	47,96	52,58	37,55	38,55	53,23	57,91	49,02	33,55	25,90
5	1,89	1,62	1,21	0,66	2,18	2,28	0,95	0,15	0,48
6	3,13	2,07	2,27	-0,40	5,08	5,12	0,08	-1,25	-1,11
7	0,000024	0,000037	0,000018	0,000023	0,000019	0,000034	0,000025	0,000030	0,000021
8	7,74	10,63	5,40	6,55	5,94	11,04	6,84	8,30	7,37
<b>Свинец</b>									
1	0,00448	0,000347	0,00339	0,00214	0,00355	0,00245	0,00297	0,00336	0,00311
2	0,0000280	0,0000110	0,0000043	0,0000025	0,0000186	0,0000024	0,0000066	0,0000052	0,0000023
3	0,00530	0,00331	0,00207	0,00158	0,00431	0,00156	0,00236	0,00229	0,00151
4	118,18	95,36	61,20	73,69	121,30	63,81	79,39	68,17	48,44
5	2,89	2,77	0,72	1,55	6,15	1,16	1,80	0,71	0,50

6	7,73	7,92	-0,30	1,63	42,09	2,30	4,11	-0,09	-1,36
7	0,0010	0,00075	0,00037	0,00034	0,00054	0,00032	0,00038	0,00072	0,00057
8	30,76	25,96	10,28	16,05	21,46	12,67	13,69	21,17	15,69

## Кобальт

1	0,00129	0,00143	0,00142	0,00134	0,00157	0,00186	0,00125	0,00138	0,00146
2	0,0000004	0,0000005	0,0000004	0,0000004	0,0000008	0,0000042	0,0000005	0,0000004	0,0000005
3	0,00067	0,00068	0,00062	0,00061	0,00091	0,00206	0,00068	0,00067	0,00068
4	51,57	47,56	43,45	45,24	58,14	110,83	54,48	48,28	46,81
5	0,57	-0,08	0,11	0,24	2,60	3,75	1,58	0,68	1,52
6	0,19	-1,41	-0,63	-0,67	9,78	13,89	3,34	-0,08	0,84
7	0,00013	0,00015	0,00011	0,00013	0,00012	0,00042	0,00011	0,00021	0,00025
8	8,53	9,29	6,48	8,09	6,71	30,38	7,88	13,07	15,00

## Никель

1	0,00086	0,00104	0,00105	0,00098	0,00107	0,00086	0,00085	0,00083	0,00092
2	0,0000002	0,0000005	0,0000002	0,0000002	0,0000010	0,0000001	0,0000001	0,0000003	0,0000001
3	0,00042	0,00068	0,00042	0,00039	0,00102	0,00034	0,00037	0,00055	0,00029
4	49,01	65,60	40,38	40,73	96,09	39,87	43,92	65,99	31,19
5	0,06	2,58	0,08	0,28	6,53	-0,11	0,46	0,93	0,29
6	-0,37	7,73	-0,02	0,03	45,07	-0,26	0,59	-0,60	-0,99
7	0,00008	0,00016	0,00007	0,00008	0,00012	0,00007	0,00006	0,00017	0,00011
8	7,96	15,52	5,90	7,08	14,44	6,75	5,93	20,18	9,11

## Цинк

1	0,00338	0,00324	0,00364	0,00398	0,00357	0,00350	0,00356	0,00384	0,00363
2	0,0000019	0,0000021	0,0000014	0,0000023	0,0000015	0,0000009	0,0000010	0,0000016	0,0000015
3	0,00138	0,00146	0,00119	0,00151	0,00121	0,00094	0,00102	0,00126	0,00123
4	40,78	45,16	32,81	37,85	33,93	26,85	28,75	32,90	33,99
5	0,21	0,58	-0,71	-0,07	0,00	-0,36	-0,39	0,27	0
6	0,78	-0,61	0,35	-1,00	-0,65	-0,56	-0,76	-0,99	-1,45
7	0,00026	0,00033	0,00021	0,00032	0,00015	0,00019	0,00017	0,00040	0,00046
8	6,29	8,69	4,59	6,47	3,53	4,24	3,56	8,11	10,08

## Распределение рудных элементов в областях будущего нагревания сиенито-диоритов

Пара-метр	Уровень глубины (м); число проб								
	0,25, n=16	0,50, n=16	0,75, n=16	1,0, n=16	1,25, n=13	1,50, n=13	1,75, n=7	2,0, n=7	2,25, n=3
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>Медь</b>									
1	0,00569	0,00522	0,00508	0,00452	0,00519	0,00542	0,00786	0,00500	0,00433
2	0,0000062	0,0000068	0,0000060	0,0000063	0,0000074	0,0000075	0,0000621	0,0000063	0,0000042
3	0,00250	0,00260	0,00224	0,00230	0,00271	0,00273	0,00788	0,00250	0,00205
4	43,94	49,89	44,08	50,91	52,27	50,35	100,25	50,14	47,42
5	-0,33	-0,28	-0,27	-0,15	0,13	0,16	1,59	0,54	0,24
6	-1,04	-0,94	-0,92	-1,04	-0,98	-1,12	1,14	0,19	-1,50
7	0,00062	0,00065	0,00056	0,00057	0,00075	0,00075	0,0029	0,00094	0,0012
8	9,15	10,79	9,18	11,09	12,75	12,12	46,49	16,42	23,31
<b>Молибден</b>									
1	0,000260	0,000276	0,000394	0,000232	0,000267	0,000679	0,000221	0,000221	0,000160
2	0	0	0,0000003	0	0	0,0000001	0	0	0
3	0,000086	0,000092	0,000552	0,000105	0,000106	0,001452	0,000096	0,000040	0,000065
4	35,64	33,29	140,29	45,52	39,66	213,83	43,55	21,70	40,50
5	0,59	0,82	3,43	1,36	1,29	3,15	0,63	0,99	0,59
6	0,63	-0,22	10,22	1,25	1,04	7,99	-1,15	0,06	-1,50
7	0,000021	0,000023	0,000138	0,000026	0,000029	0,00040	0,000036	0,000015	0,000037
8	7,06	6,51	55,10	9,57	8,92	133,57	13,66	6,07	19,05
<b>Свинец</b>									
1	0,00311	0,00318	0,00524	0,00337	0,00337	0,0032	0,00267	0,00232	0,00115
2	0,0000008	0,0000006	0,0000132	0,0000071	0,0000109	0,0000062	0,0000020	0,0000004	0,0000004
3	0,00168	0,00189	0,00363	0,00266	0,00329	0,00303	0,00140	0,00120	0,00061
4	53,98	59,59	69,30	78,91	97,85	91,04	52,58	51,46	52,80
5	1,26	0,92	1,45	2,02	1,42	1,67	-0,52	-0,65	0,69

6	1,31	0,31	2,12	4,13	1,14	2,40	-1,49	-1,25	-1,50
7	0,00042	0,00047	0,00090	0,00066	0,00091	0,00084	0,00053	0,00045	0,00035
8	12,01	13,77	17,16	20,90	32,76	29,10	17,51	17,01	26,90

**Кобальт**

1	0,00118	0,00136	0,00153	0,00200	0,00146	0,00147	0,00136	0,00129	0,00096
2	0,0000001	0,0000002	0,0000006	0,0000009	0,0000003	0,0000003	0,0000001	0,0000001	0
3	0,00032	0,00046	0,00075	0,00197	0,00050	0,00050	0,00030	0,00033	0,00012
4	27,37	33,58	48,83	98,59	34,50	34,03	21,83	25,27	12,35
5	-0,12	0,33	1,24	2,98	0,26	0,09	-0,23	-0,59	-0,21
6	-1,44	-0,77	0,87	8,09	0,33	0,35	-2,78	-1,36	-1,50
7	0,00008	0,00011	0,00018	0,00049	0,00013	0,00013	0,00011	0,00012	0,00007
8	5,19	6,57	10,49	29,90	7,53	7,41	6,11	7,17	5,12

**Никель**

1	0,00087	0,00088	0,00074	0,00079	0,00071	0,00081	0,00061	0,00076	0,00064
2	0,0000003	0,0000004	0,0000001	0,0000002	0,0000002	0,0000001	0	0,0000001	0
3	0,00058	0,00064	0,00036	0,00041	0,00042	0,00033	0,00012	0,00037	0,00016
4	66,90	72,60	48,60	52,29	59,56	40,52	20,27	48,48	25,20
5	2,55	2,09	1,13	1,01	0,37	0,73	-0,75	1,52	0,61
6	6,62	3,83	0,69	-0,22	-0,57	0,38	-0,55	1,14	-1,50
7	0,00014	0,00016	0,00009	0,00010	0,00012	0,00009	0,00005	0,00014	0,00009
8	16,28	18,39	10,42	11,49	15,27	9,16	5,63	15,71	10,92

**Цинк**

1	0,00495	0,00464	0,00467	0,00467	0,00410	0,00421	0,00424	0,00384	0,00353
2	0,0000006	0	0,0000004	0,0000009	0	0,0000001	0,0000004	0,0000008	0,0000005
3	0,00160	0,00141	0,00119	0,000137	0,00100	0,00202	0,00154	0,00087	0,00070
4	32,28	30,46	25,51	29,40	24,39	48,06	36,31	22,72	19,92
5	1,03	1,05	0,89	0,76	0,57	0,62	1,61	0,24	-0,34
6	-0,05	1,03	0,82	-0,12	-0,99	0,74	1,16	-1,32	-1,50
7	0,0004	0,0004	0,0003	0,0003	0,0003	0,0006	0,0006	0,0003	0,0004
8	6,27	5,86	4,79	5,63	5,06	11,38	10,91	6,38	8,45

## Распределение рудных элементов в блоке сиенито-диоритов

Параметр	Уровень глубины (м); число проб							
	0,25, n=22	0,50, n=13	0,75, n=25	1,0, n=16	1,25, n=49	1,50, n=20	1,75, n=20	2,0, n=9
1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>Медь</b>								
1	0,00459	0,00485	0,00476	0,00418	0,00521	0,00345	0,00456	0,00461
2	0,0000054	0,0000070	0,0000027	0,0000049	0,0000067	0,0000037	0,0000057	0,0000060
3	0,00232	0,00264	0,00164	0,00221	0,00259	0,00192	0,00239	0,00245
4	50,62	54,50	34,55	59,91	49,82	55,55	52,37	53,07
5	0,77	0,05	-0,44	0,73	0,45	0,56	0,39	0,41
6	0,30	-0,66	0,26	0,74	-0,89	-0,51	-0,13	-0,75
7	0,00049	0,00073	0,00033	0,00055	0,00037	0,00043	0,00039	0,00081
8	9,39	13,49	5,44	11,68	6,616	11,17	7,68	15,64
<b>Молибден</b>								
1	0,00026	0,000318	0,00028	0,00029	0,00028	0,00029	0,00032	0,00028
2	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0,00013	0,00018	0,00011	0,00011	0,00016	0,00017	0,00015	0,00009
4	50,18	56,43	39,02	37,77	55,82	57,79	48,85	34,09
5	2,10	1,54	1,23	0,81	2,32	2,21	0,99	0,39
6	3,79	1,17	1,92	-0,42	5,30	4,45	0,15	-0,95
7	0,00003	0,00005	0,00002	0,00003	0,00002	0,00004	0,00003	0,00003
8	9,28	14,16	6,30	7,57	7,18	11,80	6,99	8,92
<b>Свинец</b>								
1	0,00497	0,00344	0,00364	0,00197	0,00370	0,00245	0,00285	0,00314
2	0,0000342	0,0000150	0,0000046	0,0000017	0,0000232	0,0000026	0,0000051	0,0000054
3	0,00585	0,00387	0,00214	0,00132	0,00482	0,00162	0,00226	0,00232
4	117,65	112,45	58,83	66,65	130,22	66,09	79,09	73,66
5	2,49	2,54	0,58	1,55	5,55	1,16	1,99	0,98

6	5,29	5,65	—0,58	1,66	33,31	2,23	5,58	0,35
7	0,00125	0,00107	0,00043	0,00033	0,00069	0,00036	0,00037	0,00077
8	34,43	41,43	10,82	16,19	26,57	14,30	13,99	25,07
<b>Кобальт</b>								
1	0,00118	0,00133	0,00134	0,00135	0,00163	0,00190	0,00124	0,00140
2	0,0000003	0,0000004	0,0000003	0,0000003	0,0000010	0,0000048	0,0000005	0,0000005
3	0,00057	0,00060	0,00056	0,00059	0,0010	0,00220	0,00070	0,00070
4	48,86	44,83	41,78	43,32	61,04	115,48	56,24	49,96
5	0,41	0	0,02	0,24	2,45	3,55	1,57	0,57
6	0,32	—1,19	—0,21	—0,57	7,97	11,96	3,09	—0,40
7	0,00012	0,00017	0,00011	0,00015	0,00014	0,00050	0,00012	0,00020
8	8,95	10,41	6,86	8,98	8,15	34,96	8,47	14,42
<b>Никель</b>								
1	0,00083	0,00087	0,00105	0,00092	0,00108	0,00082	0,00084	0,00084
2	0,0000002	0,0000001	0,0000002	0,0000001	0,0000013	0,0000001	0,0000001	0,0000003
3	0,00045	0,00035	0,00042	0,00034	0,00115	0,00032	0,00038	0,00058
4	54,31	40,77	39,80	37,44	106,70	39,41	45,03	68,76
5	0,15	—0,49	—0,17	—0,33	5,92	—0,35	0,52	0,84
6	—0,60	—0,70	0,06	—0,07	36,70	—0,61	0,61	—0,89
7	0,00010	0,00010	0,00008	0,00008	0,00016	0,00007	0,00006	0,00019
8	10,32	9,23	6,46	7,49	19,51	7,13	6,29	22,61
<b>Цинк</b>								
1	0,00353	0,00353	0,00383	0,00440	0,0364	0,00355	0,00360	0,00402
2	0,0000021	0,0000021	0,0000014	0,0000016	0,0000015	0,0000007	0,0000010	0,0000014
3	0,00143	0,00146	0,00120	0,00127	0,00121	0,00086	0,00102	0,00120
4	40,65	41,35	31,41	28,94	33,26	28,14	28,47	29,85
5	0,06	0,47	—1,12	0,12	0,03	—0,08	0,35	0,17
6	0,81	—0,71	1,31	—1,04	—0,58	—0,87	—0,81	—0,89
7	0,0003	0,0004	0,0002	0,0003	0,0002	0,00020	0,0002	0,0004
8	7,07	9,39	4,86	5,53	3,71	4,03	3,62	7,64

## Распределение рудных элементов блока сиенито-диоритов по типам пород

Параметр	Тип породы, (число проб)				
	I, n=8	II, n=34	III, n=18	IV, n=30	V, n=31
1	2	3	4	5	6
<b>Кобальт</b>					
1	0,00155	0,00173	0,00155	0,00109	0,00154
2	0,0000003	0,0000003	0,0000006	0,0000001	0,0000003
3	0,00055	0,00051	0,00189	0,00026	0,00055
4	35,51	29,33	122,39	23,77	35,48
5	-0,03	2,0	3,58	-0,25	0,38
6	-1,69	3,66	11,60	-1,27	-0,33
7	0,00019	0,00008	0,00045	0,000047	0,00009
8	9,93	3,85	40,77	3,24	5,04
<b>Никель</b>					
1	0,00117	0,00092	0,00079	0,00054	0,00104
2	0,0000002	0,0000001	0,0000001	0	0,0000004
3	0,00041	0,00025	0,00026	0,00019	0,00063
4	35,54	26,87	32,95	32,25	60,54
5	0,39	-0,28	0,50	-0,10	1,58
6	-1,25	-2,17	-1,19	-0,60	2,26
7	0,00015	0,00004	0,00006	0,00003	0,00011
8	9,94	3,48	6,06	5,25	10,12
<b>Цинк</b>					
1	0,00440	0,00504	0,00426	0,00381	0,00446
2	0,0000004	0,0000008	0,0000001	0,0000008	0,0000009
3	0,00154	0,00135	0,00175	0,00088	0,00139
4	35,09	26,81	41,17	23,09	31,19
5	1,87	0,62	1,15	0,32	0,28
6	2,19	-0,62	1,59	-0,99	3,16
7	0,00054	0,00023	0,00041	0,00016	0,00025
8	9,79	3,47	7,94	3,14	4,33
<b>Свинец</b>					
1	0,00358	0,00494	0,00231	0,00194	0,00398
2	0,0000008	0,0000112	0,0000006	0,0000007	0,0000001
3	0,00134	0,00335	0,00078	0,00164	0,00177
4	37,49	67,74	33,95	84,66	44,48
5	0,17	1,77	1,22	2,39	0,35
6	-1,37	2,47	1,16	6,21	-0,38
7	0,00047	0,00057	0,00018	0,00029	0,00031
8	10,61	11,38	6,28	17,05	6,67
<b>Медь</b>					
1	0,00556	0,00478	0,00437	0,00483	0,00625
2	0,0000063	0,0000070	0,0000088	0,0000212	0,0000067
3	0,00229	0,00264	0,00296	0,00459	0,00238
4	41,98	55,19	67,74	95,16	38,11
5	-0,42	0,15	0,48	3,10	-0,19
6	-0,29	-1,38	-1,48	12,11	-1,19
7	0,00081	0,00045	0,00069	0,00084	0,00043
8	11,95	8,49	15,63	20,59	5,49
<b>Молибден</b>					
1	0,000228	0,000208	0,000293	0,000367	0,000416
2	0	0	0	0,0000002	0,0000009
3	0,000064	0,000048	0,000106	0,000419	0,000968
4	27,94	23,03	36,29	114,01	232,61
5	-0,84	0,43	0,96	4,35	5,24
6	-0,19	0,05	0,25	19,44	25,64
7	0,000022	0,000008	0,000025	0,000076	0,000174
8	7,51	2,93	6,79	27,42	101,57

Примечание. Типы пород: I — ожелезнение; II — хлоритизация; III — калишпатизация; IV — осветление и дробление; V — осветление и ожелезнение.

## Распределение рудных элементов по типам пород сиепито-диоритов после нагревания

Пара-метр	Тип породы, число проб				
	I, n=41	II, n=57	III, n=18	IV, n=54	V, n=58
1	2	3	4	5	6
<b>Никель</b>					
1	0,001024	0,001125	0,000927	0,000797	0,000931
2	0,0000001	0,0000013	0,0000001	0,0000002	0,0000001
3	0,00035	0,00114	0,00025	0,00044	0,000359
4	34,19	101,66	26,50	54,78	38,55
5	-0,36	5,24	0,06	0,14	0,53
6	1,76	31,24	-1,08	-0,68	0,08
7	0,000055	0,000151	0,000058	0,000059	0,000047
8	4,19	16,67	4,72	6,67	4,08
<b>Молибден</b>					
1	0,000269	0,000294	0,000233	0,000317	0,000269
2	0	0	0	0	0
3	0,000085	0,000158	0,000131	0,000183	0,000089
4	31,39	53,68	56,28	57,62	33,33
5	0,89	1,75	1,39	1,30	2,02
6	0,31	3,19	0,54	0,99	5,85
7	0,0000132	0,0000209	0,0000309	0,0000249	0,0000118
8	3,79	6,31	11,99	7,15	3,42
<b>Цинк</b>					
1	0,003598	0,003639	0,003039	0,003120	0,004029
2	0,0000010	0,0000019	0,0000021	0,0000012	0,0000013
3	0,00098	0,00138	0,00146	0,001103	0,001143
4	27,83	38,49	47,83	35,34	28,37
5	-1,09	0,13	0,14	0,72	0,10
6	2,39	-0,14	-1,50	-0,33	-0,48
7	0,000153	0,000183	0,000343	0,000150	0,000150
8	3,22	4,05	9,65	3,80	2,84
<b>Кобальт</b>					
1	0,00151	0,00158	0,00147	0,00150	0,00146
2	0,0000008	0,0000019	0,0000006	0,0000012	0,000004
3	0,00091	0,00136	0,00075	0,00111	0,00601
4	60,52	86,25	52,72	73,87	41,23
5	3,19	5,74	0,40	1,83	1,17
6	14,28	37,01	-0,60	4,66	2,63
7	0,000143	0,000180	0,000183	0,000151	0,000079
8	8,79	12,74	10,96	10,27	4,43
<b>Свинец</b>					
1	0,00409	0,00241	0,00236	0,00231	0,00454
2	0,0000136	0,0000021	0,0000014	0,0000042	0,0000262
3	0,00369	0,00145	0,001167	0,00206	0,00512
4	90,31	59,95	49,41	89,36	112,66
5	4,41	1,43	1,62	1,08	4,24
6	22,23	2,45	2,73	0,24	20,49
7	0,00058	0,000193	0,00027	0,00028	0,00067
8	16,18	7,18	10,05	13,86	19,68
<b>Медь</b>					
1	0,00500	0,00333	0,00539	0,00503	0,00419
2	0,0000036	0,0000026	0,0000059	0,0000073	0,0000052
3	0,00191	0,00167	0,00242	0,00271	0,00228
4	38,19	50,32	44,85	53,82	54,43
5	0,24	1,10	0,21	0,30	0,39
6	-0,24	2,55	-0,47	-0,78	-0,58
7	0,00029	0,00022	0,00057	0,00037	0,00030
8	4,79	5,78	8,85	6,51	6,38



## Распределение рудных элементов в блоке сиенито-диоритов до нагревания

Параметр	Структурные области, число проб									
	I, n=13	II, n=9	III, n=4	IV, n=14	V, n=8	VI, n=31	VII, n=9	VIII, n=14	IX, n=24	X, n=14
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
<b>Кобальт</b>										
1	0,000839	0,001589	0,001065	0,001478	0,001850	0,001258	0,001709	0,002001	0,001709	0,000974
2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3	0,00021	0,00017	0,000085	0,00020	0,00017	0,00033	0,00066	0,0020	0,00073	0,00029
4	25,41	10,67	7,98	13,68	9,36	26,23	39,04	100,85	42,96	29,98
5	1,14	0,85	0,0	-0,58	-0,79	-0,10	0,37	3,20	0,72	0,85
6	1,09	-0,246	-2,0	-0,94	-0,56	-0,59	-1,23	8,56	-0,28	-0,59
7	0,000059	0,000056	0,000042	0,000054	0,000061	0,000059	0,00022	0,00054	0,00015	0,000078
8	5,29	2,54	2,83	2,63	2,36	3,55	10,51	33,2	7,25	6,15
<b>Свинец</b>										
1	0,00136	0,00300	0,00205	0,00415	0,00399	0,00286	0,00390	0,00210	0,00568	0,00228
2	0,0000024	0,0	0,0	0,0000005	0,0000003	0,0000002	0,0000044	0,0000010	0,0000100	0,0000004
3	0,00153	0,00032	0,00025	0,00068	0,00053	0,0028	0,0020	0,00098	0,0031	0,00061
4	112,70	10,66	12,19	16,44	13,29	100,09	53,43	40,85	55,60	26,80
5	2,68	0,89	0,0	0,25	-0,16	2,26	0,44	1,12	1,55	0,99
6	5,94	0,033	-2,0	-1,15	-1,83	4,37	0,04	0,35	2,69	0,93
7	0,00042	0,00010	0,00012	0,00018	0,00018	0,0005	0,00069	0,00026	0,00064	0,00016
8	41,58	2,54	4,37	3,18	3,38	22,03	15,89	8,91	10,20	5,42
<b>Никель</b>										
1	0,000417	0,000944	0,00074	0,00084	0,00117	0,000633	0,000923	0,000736	0,001123	0,000764
2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,000001	0,0000001	0,0000003	0,0000001	0,0000004	0,0000001
3	0,000075	0,00013	0,00006	0,000113	0,00034	0,00025	0,00050	0,000361	0,000669	0,00024
4	18,08	13,93	8,11	13,47	29,5	39,11	55,01	49,04	59,56	31,6
5	0,99	-0,428	0,0	-1,34	-0,95	0,04	0,38	0,99	1,427	0,65

6	0,25	-1,422	-2,0	0,19	-0,78	-0,30	-0,47	0,01	1,425	0,76
7	0,000021	0,000044	0,00003	0,00003	0,00012	0,000044	0,00017	0,000097	0,000136	0,00006
8	3,66	3,35	0,88	2,59	7,99	5,68	16,43	11,28	6,54	6,54

#### Цинк

1	0,00368	0,00478	0,00350	0,00436	0,00509	0,00422	0,00476	0,00439	0,00515	0,00410
2	0,0000005	0,0000011	0,0000002	0,0000002	0,0000013	0,0000023	0,0000029	0,0000006	0,0000024	0,0000037
3	0,00071	0,00102	0,00050	0,00047	0,00115	0,00152	0,00171	0,00079	0,00154	0,00192
4	9,33	21,45	14,28	10,66	22,59	36,05	35,96	18,12	29,84	46,83
5	0,17	1,63	0,0	-0,17	1,31	1,21	0,80	0,23	-0,58	1,34
6	-0,93	1,98	-2,0	-0,96	1,17	0,50	-0,51	-1,56	2,57	1,46
7	0,0002	0,00034	0,00025	0,00012	0,00041	0,00027	0,00057	0,00021	0,00031	0,00051
8	3,93	5,28	5,15	2,04	5,93	5,14	9,51	3,53	4,68	10,61

#### Медь

1	0,00523	0,00367	0,00175	0,00420	0,00512	0,00466	0,00728	0,00611	0,00567	0,00458
2	0,0000033	0,0000057	0,0000001	0,0000029	0	0,0000096	0,0000535	0,0000065	0,0000038	0,0000109
3	0,00180	0,00239	0,00025	0,00170	0,00143	0,00309	5,00731	0,00255	0,00196	0,00329
4	34,48	65,24	5,26	42,52	27,9	27,9	100,51	41,88	34,57	71,96
5	-0,42	0,44	0,0	0,67	0,90	-0,01	1,66	0,68	0,20	0,26
6	-0,74	-1,16	-2,0	-0,99	-0,91	-1,63	1,94	-1,12	-1,33	-1,82
7	0,00050	0,0008	0,00012	0,00045	0,00051	0,00056	0,0024	0,00068	0,00040	0,00088
8	7,52	20,92	1,87	9,37	7,50	11,58	41,17	9,19	5,55	19,40

#### Молибден

1	0,000306	0,000193	0,000205	0,000209	0,000252	0,000341	0,000215	0,000336	0,000438	0,000259
2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0000002	0,0	0,0	0,0000012	0,0
3	0,000087	0,000044	0,000035	0,000034	0,000035	0,000413	0,000071	0,000135	0,001098	0,000058
4	28,46	22,74	17,07	16,40	14,10	121,08	32,93	40,07	250,68	22,59
5	0,98	0,16	0	0,07	-0,20	4,59	0,85	0,09	4,56	-0,24
6	0,64	-1,35	-2,0	-1,04	-1,03	21,15	1,17	-1,66	18,9	-0,98
7	0,000024	0,000015	0,000017	0,000009	0,000013	0,000074	0,000024	0,000036	0,00022	0,000016
8	6,02	5,63	6,21	3,18	3,60	30,49	8,56	8,70	133,28	4,48

Примечание. I — V — зоны трещиноватости; VI — X — монолитные блоки.

## Распределение рудных элементов в блоке сиепто-диоритов после нагревания

Параметр	Структурные области, число проб									
	I, n=10	II, n=13	III, n=14	IV, n=32	V, n=11	VI, n=38	VII, n=57	VIII, n=25	IX, n=39	X, n=13
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
<b>Свинец</b>										
1	0,00254	0,00385	0,00318	0,00452	0,00349	0,00113	0,00368	0,00352	0,00437	0,00216
2	0,0000031	0,0000375	0,0000024	0,0000333	0,0000029	0,0000010	0,0000123	0,0000020	0,0000124	0,0000024
3	0,00176	0,00613	0,00154	0,00577	0,00169	0,00102	0,00351	0,00143	0,00352	0,00156
4	69,39	158,98	48,44	127,49	48,67	90,90	95,25	40,58	80,52	72,18
5	1,12	3,13	0,99	4,58	0,46	2,61	4,17	0,86	3,10	1,51
6	-0,13	7,92	0,78	21,39	-0,78	8,53	21,62	-0,18	10,08	1,92
7	0,00056	0,00169	0,00041	0,00102	0,00050	0,00018	0,00046	0,00029	0,00056	0,00043
8	21,74	76,72	11,09	32,85	12,59	18,22	14,97	6,62	13,82	20,23
<b>Молибден</b>										
1	0,000427	0,000262	0,000326	0,000283	0,000322	0,000297	0,000260	0,000230	0,000274	0,000190
2	0,0000001	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3	0,000254	0,000155	0,000162	0,000112	0,000101	0,000160	0,000130	0,000061	0,000081	0,000075
4	59,51	59,23	49,69	38,19	31,24	53,90	50,14	26,75	29,75	39,55
5	0,42	1,55	1,74	1,14	0,87	1,09	2,84	1,17	0,82	2,04
6	-1,26	1,44	2,57	2,02	0,50	0,06	9,92	1,37	0,54	3,89
7	0,000080	0,000043	0,000043	0,000020	0,000030	0,000028	0,000017	0,000012	0,000013	0,000021
8	17,39	15,15	11,48	5,43	7,28	8,34	5,76	4,04	3,65	8,89
<b>Цинк</b>										
1	0,00250	0,00377	0,00392	0,00378	0,00354	0,00286	0,00365	0,00428	0,00415	0,00213
2	0,0000005	0,0000007	0,0000014	0,0000021	0,0000007	0,0000014	0,0000012	0,0000007	0,0000011	0,0000008
3	0,00072	0,00082	0,00118	0,00145	0,00081	0,00117	0,00109	0,00085	0,00106	0,00090
4	28,89	21,64	30,13	38,47	22,89	40,89	29,94	19,81	25,67	42,43
5	-0,19	-0,22	0,89	-0,29	0,37	1,32	-0,68	0,10	0,42	1,69

6	-1,50	-0,32	0,98	-1,21	-0,91	3,07	0,93	-1,00	-0,57	2,32
7	0,00023	0,00023	0,00032	0,00026	0,00024	0,00020	0,00014	0,00017	0,00017	0,00025
8	6,98	4,44	6,19	5,47	5,13	5,81	3,04	2,91	3,09	9,70

### Никель

1	0,000809	0,001245	0,000999	0,001183	0,000953	0,000679	0,000939	0,001136	0,000949	0,000794
2	0,0	0,0000008	0,0	0,0000019	0,0	0,0000002	0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0
3	0,000203	0,000886	0,000168	0,00137	0,000132	0,000393	0,000365	0,000311	0,000367	0,000211
4	25,06	71,15	16,83	116,19	13,87	72,62	38,90	27,40	38,72	26,56
5	-0,51	1,12	-0,83	5,09	-0,31	0,91	-0,06	0,81	0,03	1,01
6	-0,89	1,29	1,57	24,98	-1,17	-0,07	0,60	-0,24	-0,70	0,26
7	0,000064	0,00025	0,000045	0,00024	0,000040	0,000086	0,000048	0,000062	0,000050	0,000059
8	5,94	19,79	3,27	27,94	3,01	12,81	4,16	4,16	4,99	5,56

### Медь

1	0,00600	0,00304	0,00711	0,00398	0,00430	0,00375	0,00451	0,00640	0,00403	0,00432
2	0,0000034	0,0000021	0,0000052	0,0000036	0,0000042	0,0000036	0,0000050	0,0000034	0,0000050	0,0000060
3	0,00166	0,00143	0,00228	0,00191	0,00204	0,00189	0,00224	0,00184	0,00224	0,00245
4	30,96	47,19	32,04	47,96	47,50	50,42	49,57	28,81	55,61	56,78
5	0,82	0,67	-0,08	0,92	-0,04	0,37	0,58	0,83	0,47	0,04
6	-0,37	-0,58	-1,39	1,67	-0,89	-0,42	0,13	-0,60	-0,38	-1,63
7	0,00059	0,00040	0,00061	0,00034	0,00061	0,00033	0,00030	0,00037	0,00036	0,00068
8	7,56	11,13	6,65	7,24	12,20	7,62	5,67	4,39	8,01	14,28

### Кобальт

1	0,001418	0,001616	0,002329	0,001738	0,001641	0,001358	0,001093	0,001830	0,001448	0,000790
2	0,0000007	0,0000003	0,0000022	0,0000004	0,0000002	0,0000033	0,0000002	0,0000003	0,0000002	0,0000002
3	0,00085	0,00057	0,00149	0,00065	0,00044	0,00181	0,00043	0,00053	0,00048	0,00388
4	60,06	36,36	63,96	37,23	26,84	133,37	39,37	29,07	33,07	49,14
5	1,24	-0,40	1,27	1,20	0,57	4,53	0,19	0,46	0,20	1,81
6	0,84	-0,39	0,87	1,53	-1,09	21,36	-0,25	-0,59	0,03	2,51
7	0,00027	0,00016	0,00040	0,00011	0,00013	0,00031	0,000057	0,00011	0,00008	0,00011
8	17,62	7,75	16,30	5,26	6,12	35,05	4,22	4,44	4,13	11,73

## Распределение рудных элементов в зонах нагревания (°С) блока сиенито-диоритов

Параметр	Зона нагрева, число проб							
	До нагревания				После нагревания			
	<50, n=54	50—100, n=36	100—300, n=19	>300, n=25	<50, n=80	50—100, n=61	100—300, n=61	>300, n=50
1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>Цинк</b>								
1	0,00463	0,00437	0,00453	0,00412	0,00319	0,00386	0,00389	0,00350
2	0,0000026	0,0000009	0,0000022	0,0000014	0,0000018	0,0000020	0,0000015	0,0000009
3	0,00162	0,00096	0,00150	0,00117	0,00133	0,00142	0,00121	0,00095
4	35,06	21,99	33,05	28,39	41,67	36,73	31,08	27,03
5	1,22	0,79	0,92	0,74	0,33	—0,21	—0,06	0,21
6	1,20	2,80	0,11	—0,55	0,15	—0,67	—0,55	0,25
7	0,00022	0,00016	0,00023	0,00015	0,00018	0,00019	0,00019	0,0013
8	3,77	2,71	5,92	4,33	3,82	3,75	3,75	2,89
<b>Свинец</b>								
1	0,00324	0,00381	0,00299	0,00288	0,00355	0,00274	0,00382	0,00316
2	0,0000024	0,0000076	0,0000068	0,0000054	0,0000145	0,0000040	0,0000275	0,0000034
3	0,00156	0,00275	0,00260	0,00233	0,00381	0,00201	0,00524	0,00183
4	48,15	72,12	87,10	80,70	107,29	73,36	137,03	57,90
5	0,86	1,52	2,17	0,85	3,62	2,14	5,12	0,30
6	0,59	2,07	4,86	—0,21	15,38	6,40	27,60	—0,23
7	0,00021	0,00046	0,00060	0,00047	0,00043	0,00026	0,00082	0,00026
8	5,61	12,15	22,42	17,32	15,41	9,60	33,00	7,48
<b>Кобальт</b>								
1	0,00130	0,00165	0,00135	0,00142	0,00135	0,00155	0,00144	0,00140
2	0,0000002	0,0000018	0,0000004	0,0000003	0,0000005	0,0000018	0,0000010	0,0000004
3	0,00041	0,00136	0,00059	0,00052	0,00071	0,00134	0,00099	0,00066
4	31,64	82,54	44,41	36,54	52,84	86,37	68,68	46,84
5	—0,02	4,72	1,30	1,18	0,76	5,65	2,90	1,21

6	-1,22	23,51	1,43	0,84	0,11	37,41	11,05	2,65
7	0,00006	0,00023	0,00014	0,00010	0,00008	0,00017	0,00015	0,00009
8	3,34	14,95	8,51	5,82	5,21	12,34	10,57	5,62

**Никель**

1	0,00087	0,00081	0,00073	0,00072	0,00093	0,00106	0,00086	0,00087
2	0,0000003	0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000002	0,0000011	0,0000001	0,0000001
3	0,00051	0,00033	0,00036	0,00038	0,00048	0,00106	0,00036	0,00037
4	58,61	40,56	49,86	53,03	51,81	99,63	42,16	42,40
5	3,32	0,76	0,75	1,33	2,13	6,10	-0,13	-0,28
6	6,61	0,82	0,52	1,82	9,86	41,33	-0,40	-0,12
7	0,00007	0,00005	0,00008	0,00008	0,00005	0,00014	0,00006	0,00005
8	7,32	5,51	9,90	9,37	5,08	15,58	5,42	4,94

**Медь**

1	0,00560	0,00456	0,00496	0,00470	0,00433	0,00457	0,00434	0,00463
2	0,0000144	0,0000065	0,0000050	0,0000076	0,0000052	0,0000060	0,0000041	0,0000057
3	0,00380	0,00255	0,00224	0,00276	0,00228	0,00246	0,00203	0,00239
4	67,74	55,89	45,14	58,81	52,63	53,78	46,80	51,65
5	2,75	0,47	-0,33	0,27	0,53	0,44	0,57	0,44
6	12,85	-1,09	-0,58	-0,79	-0,28	-0,26	-0,23	-0,29
7	0,00052	0,00042	0,00051	0,00055	0,00025	0,00031	0,00032	0,00034
8	9,03	8,40	10,89	10,82	5,19	6,12	6,20	6,40

**Молибден**

1	0,00024	0,00033	0,00025	0,00022	0,00028	0,00030	0,00028	0,00029
2	0	0,0000001	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3	0,0000685	0,00038	0,00012	0,000099	0,00015	0,00015	0,00012	0,00013
4	28,15	115,36	47,73	44,92	53,69	50,90	48,08	42,66
5	0,05	5,08	1,19	1,79	1,88	1,73	1,54	1,94
6	-0,16	26,0	0,59	2,81	3,60	3,50	2,16	4,53
7	0,000009	0,000064	0,000027	0,000019	0,000017	0,000019	0,000018	0,000017
8	2,92	26,01	9,34	7,53	5,33	5,68	5,41	4,98

Предисловие	3
Введение	5
<b>Глава 1. Обзор лабораторных экспериментальных исследований</b>	<b>9</b>
Изменение пористости пород с нагреванием	—
Термическая мобилизация поровых растворов и вещества пород	11
Термоградиентное перераспределение компонентов гранитов при слабом нагревании	14
Физические особенности гранита	—
Распределение петрогенных и рудных компонентов	16
Термоградиентное перераспределение компонентов гранита при интенсивном нагревании	18
Физико-химические и теплофизические преобразования	20
Минеральные преобразования гранитов и перераспределение его компонентов	21
Эндоклавные методы моделирования тепло- и массопереноса в геологических средах	26
Устройство проточного «эндоклава»	27
<b>Глава 2. Анализ результатов нагревания лессовидных пород Алмалыкского района</b>	<b>29</b>
Выбор экспериментального блока и его исходные геолого-физические особенности	—
Подготовка участка к эксперименту	—
Исходные физические и химические особенности опытного блока	30
Монтаж измерительной аппаратуры	34
Теплофизические параметры экспериментального блока пород перед окончанием опыта	35
Распределение температур	36
Тепловой поток	—
Результаты эксперимента	37
Статистический анализ материалов	47
Распределение элементов в зоне максимального нагревания	50
<b>Глава 3. Нагревание блока сиенито-диоритов Алмалыкского района</b>	<b>51</b>
Выбор экспериментального блока и его исходные геологические особенности	—
Схема полевого эксперимента, измерения и опробование блока	54
Опробование	55
Теплофизические параметры экспериментального блока перед окончанием опыта	—
Распределение температур	—
Распределение влажности	56
Особенности распределения рудных элементов в экспериментальном блоке до и после нагревания	—
Поведение рудных элементов в пределах экспериментального блока	—
Изменение средних содержаний рудных компонентов с глубиной	58
Распределение рудных компонентов в разных типах сиенито-диоритов	60
Изменение содержания рудных элементов в зависимости от тектонического строения	62
Размещение рудного вещества в локализованном температурном поле	66
Распределение свинца	—
Распределение кобальта	68
Распределение никеля	70
Распределение цинка	72
Распределение меди	73
Распределение молибдена	75
Статистические особенности взаимосвязи тепловых и вещественных полей	77

<i>Глава 4. Общие закономерности распределения элементов в неоднородных тепловых полях</i>	80
Нагревание лессовидных пород	81
Нагревание сиенито-диоритов	83
Анализ коэффициентов вариации содержаний рудных элементов в породах экспериментального блока	88
<i>Глава 5. Проект крупнопланового геолого-физического полигона для моделирования геохимических процессов</i>	91
Принцип устройства полигона, типы реакционных камер	—
Методика эксперимента	92
Постановка эксперимента	93
Координационно-вычислительная группа и техническое обслуживание эксперимента	94
Первоочередные задачи крупнопланового эксперимента	95
Физико-химические закономерности	—
Теплофизические и энергетические особенности	96
Кинетика и динамика процесса	—
Заключение	97
Литература	100
Приложения	103



*Дударев Александр Николаевич, Сотников Виталий Иванович,  
Васильева Александра Ивановна*

**МОБИЛИЗАЦИЯ РУДНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ  
В ТЕРМОГРАДИЕНТНЫХ ПОЛЯХ**

Ответственный редактор  
*Виктор Николаевич Шарапов*

Редактор *Л. И. Замулло*  
Художественный редактор *М. Ф. Глазырина*  
Художник *А. А. Заплавный*  
Технический редактор *Г. Я. Герасимчук*  
Корректор *Л. И. Замулло*

---

Сдано в набор 22 августа 1975 г. Подписано в печать 22 апреля 1976 г. МН 02045. Формат 70×108<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Бумага типографская № 2. 8,5 печ. л., 11,9 усл. печ. л., 12 уч.-изд. л. Тираж 1000 экз. Заказ № 646.  
Цена 1 р. 21 к.

---

Издательство «Наука», Сибирское отделение. 630099, Новосибирск, 99, Советская, 18.  
4-я типография издательства «Наука». 630077, Новосибирск, 77, Станиславского, 25.

Страница	Строка	Напечатано	Следует читать
21	6 снизу	в границе	в граните
32	21 снизу	насосов	паносов
96	3 сверху	гидротермальной	гидротермальный

**А. И. Дударев, В. И. Сотников, А. И. Васильева. Мобилизация рудных элементов в термоградиентных полях.**