

АЭРОРАДИОГЕОХИМИЧЕСКОЕ КАРТИРОВАНИЕ

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

МИНИСТЕРСТВО ГЕОЛОГИИ СССР
НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ "РУДГЕОФИЗИКА"

АЭРОРАДИОГЕОХИМИЧЕСКОЕ
КАРТИРОВАНИЕ

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

ОДОБРЕНИЯ

Управлением геофизических работ
Министерства геологии СССР
12 июля 1983 г.

Ленинград
1983

УДК 550.83; 550.835

Аэорадиогеохимическое картирование. Методические рекомендации. Л.: НГО "Рудгеофизика", 1983.

Рассмотрены принципы составления аэорадиогеохимических карт по материалам воздушных гамма-спектрометрических и геолого-ландшафтных исследований.

Описана методика составления аэорадиогеохимических карт вручную, с применением аппаратуры ИКА-2 на борту самолета и с использованием ЭВМ. Анализируются вопросы и результаты применения аэорадиогеохимических построений для задачи прогнозирования и поисков месторождений твердых полезных ископаемых.

Предназначены для геологов, геофизиков, геохимиков, занимающихся вопросами прогнозирования и поисков месторождений полезных ископаемых.

Составители: Е.Б.Высокоостровская, А.И.Краснов, Е.И.Зубов,
В.А.Смирнов, А.С.Серых, В.Я.Никитин, Ю.Б.Новиков,
М.Е.Михайлова, Г.Б.Мукарева, В.Г.Зайцев, Е.В.Плющев

Научный редактор: А.И.Краснов.

ВВЕДЕНИЕ

Практические исследования последних лет показали, что пространственное распределение многих месторождений и перспективных рудоносных структур контролируется ореолами повышенных (аномальных) концентраций урана, тория и калия в горных породах.

Прогнозно-поисковое значение ореолов аномальных концентраций радиоактивных элементов заставило исследователей обратить внимание на методику радиогеохимического картирования, разработанную в 1960–1970 гг. [18, 23].

В первоначальном варианте предложенная методика исключала возможность использования аэрогамма-спектрометрических (АГС) данных, а ее широкое применение на практике сдерживалось трудоемкостью наземного изучения распределения содержаний радиоактивных элементов в горных породах, малой оперативностью и высокой стоимостью аналитических работ.

В 1970–1975 гг. для повышения эффективности геолого-поисковых и прогнозных исследований была разработана методика построения радиогеохимических карт с использованием материалов АГС съемки [1–3]. Результирующие карты получили наименование аэрорадиогеохимических, а комплекс работ по их составлению стал называться аэрорадиогеохимическим картированием.

В процессе производственного опробования в различных районах СССР методика построения аэрорадиогеохимических карт уточнялась и совершенствовалась. В 1977–1980 гг. был разработан алгоритм автоматизированного построения аэрорадиогеохимических карт, реализованный впоследствии в автоматизированных системах обработки аэроданных.

В окончательном варианте методика аэрорадиогеохимического картирования, исключая затраты на опробование горных пород, обеспечивает экспрессное получение информации для прогнозных и поисковых исследований широкого круга полезных ископаемых.

В настоящих рекомендациях обобщен накопленный за последние годы производственными и научно-исследовательскими организациями положительный опыт аэрорадиогеохимического картирования в средних и крупных масштабах.

Рекомендации составлены Е.Б.Высоцкостровской (введение, гл. I; 2.4; 3.1; 3.4; 4; 5.1; 5.3, приложение I), А.И.Красновым (гл. 2.4; 4.2; 5.2; заключение), Е.И.Зубовым (гл. 3, приложение 2), В.Я.Ни-

Китиным, Ю.Б.Новиковым (гл.2); А.С.Серых, В.А.Смирновым (гл.5);
М.Е.Михайловой, Г.Б.Мукаревой (гл.4, 5); Е.В.Плыщевым (гл.4).

Авторы выражают глубокую благодарность Ю.В.Хромову за ценные
практические замечания, которые были учтены авторами при подго-
товке рукописи к изданию.

Глава I. ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ АЭРОРАДИОГЕОХИМИЧЕСКОГО КАРТИРОВАНИЯ

I.I. Общие положения

Под аэорадиогеохимическими картами понимаются карты пространственного распределения фоновых и отличных от фона концентраций естественных радиоактивных элементов в горных породах, измеренные аэротетодом на уровне современного эрозионного среза, представленные на единой геологической (формационной или литологической) основе с цветовой раскраской в единицах концентраций элементов главной геохимической нагрузки.

Первичной информацией при составлении карт служат АГС данные, представительные для слоя земной поверхности мощностью от 10–20 до 35–50 см.

При использовании АГС метода для радиогеохимических построений необходимо учитывать мощность перекрывающих геологические образования рыхлых отложений и их состав. Благоприятными являются районы с хорошей и средней обнаженностью, где выходы коренных пород занимают не менее 30% изучаемой площади. В закрытых районах аэро-гамма-спектрометрические данные могут быть использованы для радиогеохимического картирования рыхлого чехла.

Специфика АГС данных заключается в определении концентраций урана и тория в горных породах по короткоживущим продуктам распада радиоактивных эманаций, исходя из предположения равновесных соотношений между изотопами в соответствующих радиоактивных семействах, справедливого для большинства горных пород элювиальных и трансэлювиальных ландшафтов.

При необходимости сдвиг радиоактивного равновесия между ураном и радием может быть учтен при составлении аэорадиогеохимических карт проведением специальных опытно-методических работ.

Метод аэорадиогеохимического картирования вначале был разработан и применялся для прогнозирования и поисков месторождений редких и рассеянных элементов и, в меньшей степени, для других полезных ископаемых. Эффективное применение аэорадиогеохимических карт для прогнозирования месторождений черных, цветных, редких и благородных металлов возможно лишь при наличии устойчивой ассоциации между радиоактивными и рудообразующими элементами.

Для применения аэорадиогеохимического картирования на *определен*ный вид полезного ископаемого выбирают наиболее *информативные*

ведущий элемент, который используется в качестве главной геохимической нагрузки. Так, при поисках и прогнозировании месторождений редких элементов, грейзеновых месторождений олова, вольфрама, молибдена, редкometальных апогранитов нормального и субщелочного ряда с бериллием, оловом, вольфрамом, медистых песчаников и сланцев, фофоритов, ртути, некоторых месторождений сульфидной формации и плавикового шата в качестве ведущего геохимического элемента используется концентрация урана (радия).

При поисках и прогнозировании месторождений тория, редкоземельного, тантало-ниобиевого и циркониевого оруденения в апогранитах щелочного ряда, большинства месторождений кор выветривания (бокситы, латериты, редкometальные россыпи), кимберлитовых трубок в качестве основной геохимической нагрузки может использоваться торий.

Возможности использования калия в качестве главной геохимической нагрузки радиогеохимических карт представляются более ограниченными (месторождения нефелинового сырья).

Аэrorадиогеохимические карты строятся в мелком (меньше I:1 000 000), среднем (I:500 000 – I:100 000), крупном (I:50 000–I:25 000) и детальном (крупнее I:25 000) масштабах.

В мелких масштабах они используются для решения региональных задач прогнозирования месторождений полезных ископаемых. Опыт практического применения таких карт пока невелик.

Среднемасштабные аэrorадиогеохимические карты используют для выявления общих закономерностей распределения радиоактивных элементов в геологических комплексах региона, определения косвенных поисковых признаков рудноносных областей, провинций, специализированных геологических формаций и выделенияrudоперспективных структур (зон, районов, узлов) с нарушенным первично-конституциональным распределением радиоактивных элементов. Результаты среднемасштабного аэrorадиогеохимического картирования используют для планирования крупномасштабных прогнозных и детальных поисковых работ. На основе среднемасштабных аэrorадиогеохимических карт прогнозирование оруденения, как правило, ведут по генетическим признакам, но без разделения на промышленные типы.

Крупномасштабные аэrorадиогеохимические карты используют для выявления прямых и косвенных поисковых признаков рудных узлов и полей месторождений с целью постановки поисковых и поисково-оценочных работ в масштабах I:25 000 – I:10 000. Крупномасштабное аэrorадиогеохимическое картирование выполняют, как правило, на

определенными типы месторождений полезных ископаемых.

Детальные аэrorадиогеохимические карты составляют с целью изучения закономерностей распределения радиоактивных элементов в пределах перспективных структур и рудных полей месторождений для выявления локальных ореолов рассеяния, контролирующих отдельные рудные тела.

В зависимости от конкретного уровня автоматизации процесса обработки АГС информации аэrorадиогеохимические построения могут быть выполнены вручную с частичным применением ЭВМ и полностью автоматизированным путем. Наиболее рационально строить аэrorадиогеохимические карты силами аэрапартии (летного отряда) в процессе полевой интерпретации АГС данных с последующим их уточнением на камеральном этапе.

Составлению аэrorадиогеохимических карт предшествует построение в том же масштабе вспомогательных основ: ландшафтной и геологической (формационной или литологической), которые используются в дальнейшем совместно с картами концентраций радиоактивных элементов для радиогеохимической характеристики однородных по ландшафтно-геологическим условиям участков (таксонов).

Эффективность аэrorадиогеохимического картирования во многом зависит от качества исходных материалов.

I.2. Требования к составлению вспомогательных основ аэrorадиогеохимических карт

I.2.1. Ландшафтная основа

Ландшафтную основу составляют в камеральный период на этапе, предшествующем проведению полевых работ. Материалами для ландшафтной характеристики района работ служат: топографические карты, фотопланы, космические снимки, специализированные геоморфологические, почвенные, климатические карты, карты четвертичных отложений, кор выветривания, типов растительности, а также карты природных условий ведения работ.

При составлении ландшафтной основы используют принцип регионального и локального ландшафтно-геохимического районирования, позволяющий учесть особенности миграции радиоактивных элементов в различных природных условиях в соответствии с масштабом и задачами исследований. Региональное ландшафтное районирование проводят с учетом сведений о почвенно-растительном покрове (пустынная, степ-

ная, лесостепная, таежная, тундровая зоны), климате (аридная, се-миаридная, гумидная, семигумидная, криогенная зоны) и морфологи- рельефа (равнинная, предгорная, горная и другие зоны).

В основу локального ландшафтного районирования положено выделение элементарных ландшафтов, которые подразделяют на следующие типы: элювиальные (водораздельных пространств), трансэлювиальные (склоновых областей), аккумулятивные (цини впадин, логов, ложбин), супераквальные (руслей рек, ручьев и т.п.).

Наиболее существенную роль при их выделении оказывают реуль-таты дешифрирования аэрофотоснимков.

В зависимости от геоморфологических условий района работ и мас-штаба исследований используются два, три или четыре типа элемен-тарных ландшафтов, различающихся по содержаниям радиоактивных эле-ментов [8].

При составлении мелко- и среднемасштабных карт на ландшафтной основе выполняют районирование территории с выделением однородных ландшафтно-климатических зон, а в их пределах - ассоциаций сопод-чиненных элементарных ландшафтов (элювиальные, трансэлювиальные, аккумулятивные и их комбинации).

0 200 400 600 м

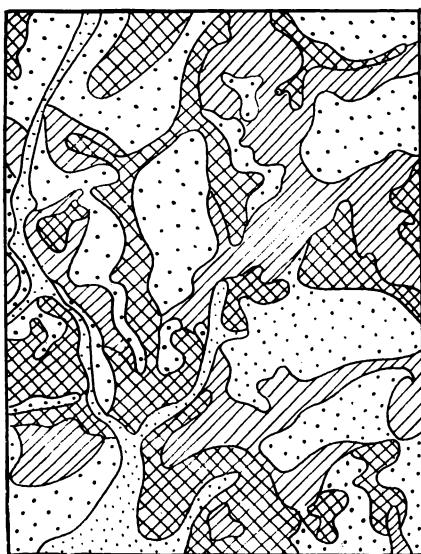


Рис. I. Ландшафтная основа круп-номасштабной аэrorадиогеохи-ческой карты (горно-таежная зо-на).

Ландшафты: 1 - элювиальный; 2 - аккумулятивно-денудационный; 3 - выполненных склонов; 4 - аллювиальный; 5 - границы эле-ментарных ландшафтов

1 2 3 4 5

На крупномасштабных и детальных картах выделяют только элементарные ландшафты. При необходимости производят более детальное расчленение подчиненных ландшафтов, исходя из решаемых задач (рис. I).

Границы ландшафтно-климатических зон и элементарных ландшафтов наносят на прозрачную пленку или восковку в масштабе составляемой аэорадиогеохимической карты и используют в дальнейшем для выделения однородных ландшафтно-геологических подразделений.

I.2.2. Геологическая основа

Сбор материалов для составления геологической основы аэорадиогеохимической карты производят в предполевой камеральный период.

Требования к составлению геологической основы радиогеохимических карт детально изложены в работе [23]. Применительно к аэорадиогеохимическим картам они включают в себя следующие основные положения.

В качестве специализированной основы аэорадиогеохимических карт используют геологическую карту, составляемую в масштабе аэросъемки, на которую в штриховой легенде в черно-белом исполнении наносят пространственное положение геологических тел с изображением их вещественного состава (литологии), возраста, формационной (фашиальной) принадлежности, эпигенетических изменений и тектонических элементов.

Важнейшим требованием к геологической основе аэорадиогеохимической карты любого масштаба является однородность представленных на ней элементарных таксонов (комплексов, геологических формаций), соответствующих принятому для данного масштаба и целей исследований.

Геологически однородные объекты выделяют с учетом степени их изученности, вещественного состава, возрастных и генетических особенностей, специфики проявления эпигенетических процессов, характера и интенсивности регионального гамма- поля.

Элементарные таксоны должны быть достаточными по площади для изображения на карте и формирования выборки. Минимальные размеры контуров геологических объектов на карте любого масштаба должны быть не менее эффективного радиуса действия аэрогамма-спектрометра, т.е. радиуса круга, с которого на высоте съемки фиксируется 90% гамма-излучения бесконечного полупространства [8]. В общем случае эффективный радиус (R) равен двум высотам полета носителя.

При проведении границ сложно построенных геологических тел возможна их генерализация на основе однотипности вещественного состава. Неверное определение генеральной совокупности и границ таксонов существенно влияет на уровень минимально-аномальных содержаний элементов и правильность выделения полей аномальных концентраций.

Геологическую основу мелко- и среднемасштабных карт представляют в формационном исполнении. При составлении крупномасштабных и детальных карт используют литологические и фаунильные признаки.

Из-за недостаточной геологической изученности территории и в целях придания специализированного характера геологическим исследованиям во многих случаях составление геологической основы аэро-радиогеохимических карт проводят обобщением имеющихся геологических карт различного содержания. При этом могут быть использованы материалы государственных геологических съемок, отвечающие соответствующим кондициям и современным инструктивным требованиям проведения геолого-съемочных работ, карты полезных ископаемых, геолого-структурные, литолого-фаунильные, формационные, геохимические и другие сведения геологического содержания.

При наличии специализированной геологической карты на изучаемую территорию она может быть положена в основу радиогеохимических построений. Если используют разномасштабные геологические карты, составленные различными организациями, необходимо осуществить общее редактирование геологической основы, уделяя особое внимание возможным допускам при датировке возраста геологических образований, принадлежности магматических тел к определенным комплексам, изображению наиболее важных тектонических элементов и т.д. Исходную геологическую карту упрощают за счет исключения элементов геологического строения, не оказывавших существенного влияния на распределение урана, тория и калия. Вместе с тем на ней особо выделяют те элементы геологической нагрузки, которые подчеркивают геологические процессы и факторы, прямо или косвенно связанные с перераспределением радиоактивных элементов и формированием оруденения. Большое значение придают выделению на составляемой геологической основе геохимически и металлогенически специализированных геологических формаций и оконтуривание участков и зон проявления различных рудоформирующих и эпигенетических изменений пород [14]. Геохимически специализированные магматические, метаморфические, вулканогенно-осадочные и осадочные формации (комpleксы, свиты, толщи) изображают наиболее выделяющимися штриховыми знаками, обычно утолщенных линий. На крупномасштабных и детальных радиогеохи-

мических картах факторы стратиграфического, литологического, магнитического контроля могут быть показаны цветными штрихами. Рудо-контролирующие и рудовмещающие тектонические элементы изображают большей толщиной линий в отличие от прочих. Эпигенетические изменения наносят различными формами черного края. На геологическую основу выносят прямые признаки оруденения: месторождения, рудопроявления, проявления точки минерализации, локальные аномалии, связанные с ореолами рассеяния, элементы, сопутствующие оруденению. Месторождения и рудопроявления классифицируют по генетическим типам и масштабам.

Геологическую основу аэrorадиогеохимической карты сопровождают стратиграфической колонкой и серией геологических разрезов для иллюстрации временных, пространственных и объемных особенностей распределения радиоактивных элементов.

I.2.3. Аэrogамма-спектрометрические данные

При ручной обработке исходными данными для радиогеохимических построений являются карты концентраций урана (радия), тория, кальция и карты локальных гамма-аномалий, составленные по материалам кондиционных АГС съемок в соответствии с требованиями технической инструкции [25] и методических рекомендаций [1, 2]. Локальные гамма-аномалии, параметры которых на основании известных критериев [1, 2, 25] свидетельствуют о перспективности их на определенный вид полезного ископаемого, должны быть выделены особыми знаками [2, 25].

При автоматизированной обработке аэрогеофизической информации целесообразно для аэrorадиогеохимических построений использовать записанные на магнитных носителях внешней памяти ЭВМ значения концентраций радиоактивных элементов, рассчитанные с учетом межвылетной увязки для узлов регулярной сети на всю площадь участка, а также числовые массивы с данными по привязке измерений и параметрами локальных аномалий.

I.3. Методика составления аэrorадиогеохимических карт вручную

I.3.1. Крупномасштабные аэrorадиогеохимические карты

Совмещением ландшафтной и геологической (литологической, фаунистой) основ на прозрачной пленке или восковке составляют карту

однородных ландшафтно-геологических (литологических, фациальных) комплексов (таксонов). Составленную карту последовательно накладывают на карты концентраций радиоактивных элементов и для каждого выделенного однородного таксона считывают и заносят в журнал не менее n_{min} значений концентраций, равномерно распределенных по всей площади изучаемого объекта. Минимальный объем выборки n_{min} рассчитывается, исходя из величины коэффициента вариации (V) содержаний элемента с самым неравномерным распределением и заданного в абсолютных единицах уровня погрешности среднего арифметического λ [22]

$$n_{min} = (tV\bar{q}/100\lambda)^2,$$

где t - коэффициент доверительной вероятности, равный при 5% уровне значимости 1,96; $V = \frac{\bar{S}}{\bar{q}^2} \cdot 100\%$ - коэффициент вариации; \bar{q} - среднее арифметическое; \bar{S} - стандартное отклонение.

Обычно при ручной обработке АГС данных для статистической характеристики каждого однородного объекта используют от 50 до 100-150 наблюдений. Статистический анализ выборочных данных имеет своей целью вычисление параметров нормального геохимического фона по выделенным ландшафтно-геохимическим (фациальным, литологическим) подразделениям.

Применительно к аэroradiogeохимическому картированию принято определение нормального геохимического фона, обоснованное в работах [18, 23]: к фоновой совокупности каждой однородной геологоландшафтной разности относится диапазон изменения концентраций, которому соответствует 80% площади под кривой распределения плотности вероятностей. При аппроксимации эмпирического распределения нормальным законом $\bar{q} \pm I,3 S$ (1.1), при логнормальном распределении-Ме. $\bar{X} \pm I,3 S_{ln}$ (1.2).

Здесь \bar{q} - выборочное среднее арифметическое измеренных концентраций радиоактивных элементов; S - оценка выборочного среднего квадратичного отклонения измеренных концентраций; Ме - медиана выборочного распределения концентраций; \bar{X} - антилогарифм величины $I,3 S_{ln}$; S_{ln} - оценка выборочного среднего квадратичного отклонения логарифмов концентраций.

Аномальными называют концентрации, не попавшие в интервалы, которые с надежностью 99,7% обеспечивают правильность отнесения наблюдений к рассматриваемой совокупности

$$\bar{q} \pm 3S \quad \text{и} \quad (I.3)$$

$$Me \cdot \bar{Z} \pm I \quad (I.4)$$

при аппроксимации эмпирического распределения нормальным и лог-нормальным законом соответственно (\bar{Z} -антилогарифм величины $3 S_{ln}$). Аномальные концентрации могут быть высокими ($\bar{q} + 3S$) и низкими ($\bar{q} - 3S$).

Значения концентраций в интервале от ($\bar{q} + 1,3S$) до ($\bar{q} + 3S$) называют повышенными концентрациями. На практике, на аэорадиогеохимических картах выделяют, как правило, области фоновых, повышенных и аномально высоких концентраций. Использование пониженных по сравнению с геохимическим фоном значений (с концентрациями менее $\bar{q} - 1,3S$) для карттирования возможных зон выноса элементов по АГС данным в ряде случаев затруднено из-за ошибок в области порога чувствительности аэрогамма-спектрометра и неоднозначности их геологической интерпретации (мешающее влияние обводненных участков, неравномерность обнаженности и т.д.).

Пример выделения аномальных концентраций по описанной схеме приведен на рис.2.

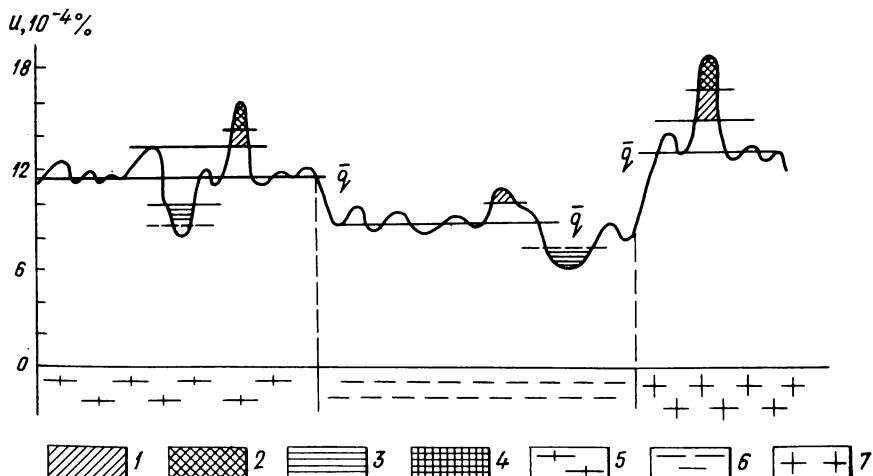


Рис.2. Принципиальная схема определения числовых аэорадиогеохимических параметров

Шкала аномальных (отличных от фоновых) содержаний: 1 - повышенных (от $\bar{q} + 1,3S$ до $\bar{q} + 3S$); 2 - аномально-высоких $> (\bar{q} + 3S)$; 3 - пониженных (от $\bar{q} - 1,3S$ до $\bar{q} - 3S$); 4 - аномально-низких $< (\bar{q} - 3S)$; 5 - гнейсы; 6 - сланцы; 7 - граниты

В соответствии с принятым выше статистическим определением, выборочные совокупности, по которым рассчитывают характеристики нормального геохимического фона, должны, в первую очередь, содержать наиболее типичные для неизмененных горных пород значения концентраций радиоактивных элементов. Поэтому, при формировании выборок обязательно следует учитывать идентичность условий измерения. В частности, в выборку не включают выделенные при просмотре лент аналоговой записи локальные аномалии концентраций радиоактивных элементов, свидетельствующие о наличии геологической или ландшафтной небородности в пределах исследуемого объекта.

При ручной обработке АИС данных для оперативного определения статистических параметров выборочного распределения целесообразно использовать "вероятностный" трафарет [6].

Результаты статистической обработки (средние значения концентраций радиоактивных элементов, их отношения, нижние границы повышенных и аномальных содержаний, коэффициенты вариации, объемы выборок) оформляют в виде таблиц, которые вычерчивают как самостоятельный документ, либо включают во внутрирамочное оформление аэорадиогеохимической карты.

Раскраску карты выполняют в единицах концентраций элемента главной геохимической нагрузки.

Для оконтуривания областей аномальных концентраций радиоактивных элементов карту с границами однородных ландшафтно-геологических подразделений, выполненную на прозрачном материале, последовательно накладывают на карты оцифровок и в пределах каждого выделенного на ней таксона проводят изолинии концентраций элементов, соответствующие рассчитанным границам геохимического фона. При этом допускается осреднение наблюдаемого поля с отклонением от рассчитанных значений в пределах полевой точности измерений.

Контуры ореолов аномальных концентраций элементов показывают цветной сплошной (аномально высокие содержания $\geq \bar{q} + 3S$) или пунктирной (повышенные содержания $\geq \bar{q} + 1,3S$) линиями. Для урана используют красные тона, тория - синие, калия - зеленые.

Области, характеризующиеся повышенными и аномально высокими концентрациями радиоактивных элементов, обединяют с учетом особенностей геолого-структурного строения района в соответствующие зоны нарушенного распределения элементов (зоны привноса по А.А. Смыслову).

Выделенные зоны нарушенного распределения классифицируют по размерам, геохимическим особенностям, связи с вмещающими породами и

типами эпигенетических процессов.

Операции по составлению аэroradiogeохимических карт целесообразно выполнять в процессе полевой интерпретации аэрогеофизических данных по мере накопления АГС информации. Построенная карта аномальных концентраций позволяет уже в полевой период оперативно выделять перспективные площади для постановки детальных поисково-оценочных работ и более целенаправленно проводить наземное изучение локальных АГС аномалий.

Макет карты аномальных концентраций урана (радия) изображен на рис.3.

В окончательном виде аэroradiogeохимическую карту составляют на камеральном этапе интерпретации АГС данных путем совмещения уточненной по результатам наземных посещений геологого-ландшафтной основы с картой аномальных концентраций элемента главной геохимической нагрузки (рис.4).

Раскраску аэroradiogeохимической карты выполняют в единой цветовой легенде в обычной гамме цветов (синий, зеленый, желтый, оранжевый, красный и т.д.). Градации для раскраски геохимического фона выбирают с учетом вычисленных по формулам 3.9 величин доверительных интервалов, в которых с заданной вероятностью заключены истинные (в статистическом смысле) средние значения концентраций радиоактивных элементов в выделенных геолого-ландшафтных таксонах.

Площадь карты внутри обозначенного контура нормального геохимического фона раскрашивают в цвет, соответствующий средней концентрации элемента главной геохимической нагрузки, вычисленного для каждого конкретного таксона.

С целью выделения слабо проявленных ореолов рассеяния, на площадях распространения рудоконтролирующих комплексов (фаций, отдельных литологических горизонтов, тектонических структур и т.д.) в пределах нормального геохимического фона дополнительными контурами могут быть выделены группы соседних точек с концентрациями, превышающими средние значения не менее, чем на величину стандартного отклонения. При этом обычно руководствуются следующим формальным соотношением:

$$\varphi_{min\ an} = \bar{\varphi} + 1,3 S/\sqrt{m}, \quad (I.5)$$

где $\varphi_{min\ an}$ - концентрации, соответствующие уровню дополнительного контура в пределах нормального геохимического фона (минимально аномальное значение); m - число соседних предположительно

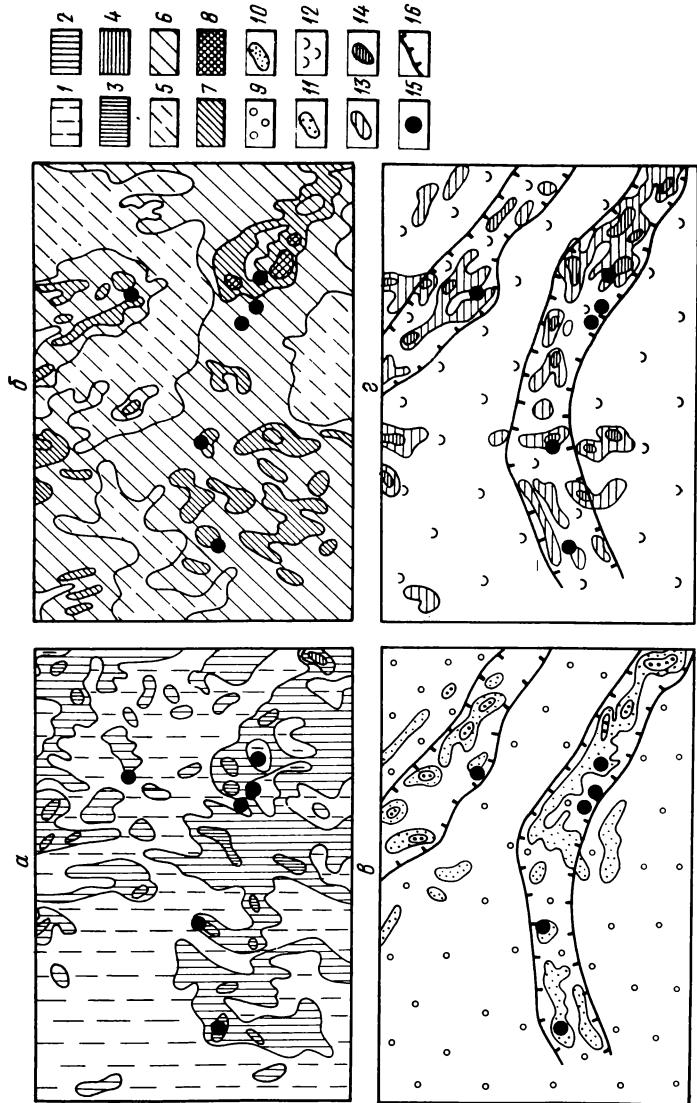
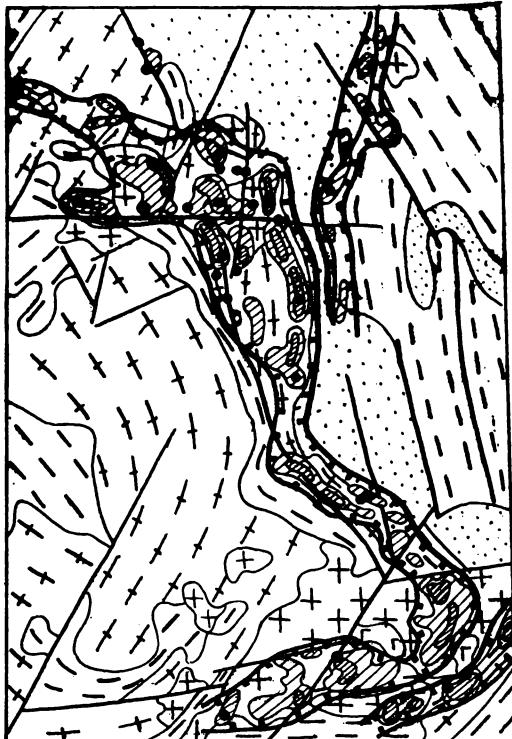


Рис.3. Карты измеренных концентраций урана (а), тория (б) и аномальных аэромагнитических полей (в) и тория (г).
Поля концентраций урана в $10^{-4}\%$: I - до 3; 2 - от 3 до 4; 3 - от 4 до 5; 4 - от 5 до 6; то же для тория в $10^{-4}\%$: 5 - до 4; 6 - от 4 до 8; 7 - от 8 до 12; 8 - от 12 до 20; аэромагнитические поля урана: 9 - фоновые; 10 - повышенные; 11 - нормальные-высокие; 12 - повышенные; 13 - повышенные; 14 - аномально-высокие; 15 - рудные проявления; 16 - границы аэромагнитических зон

аномальных наблюдений; S - стандартное отклонение.



- | | | | | |
|---|---|---|---|----|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |

Рис.4. Макет крупномасштабной аэрорадиогеохимической карты.
1 - песчаники; 2 - кристаллические сланцы; 3 - гранито-гнейсы; 4 - граниты; 5 - амфиболиты (ксенолиты); 6 - разломы; 7 - повышенные; 8 - аномально-высокие; 9 - рудные проявления; 10 - границы аэрорадиогеохимических зон

На окончательную аэрорадиогеохимическую карту выносят контуры радиогеохимических зон. Карта сопровождается стратиграфической колонкой и геологическими разрезами. Стратиграфическую колонку раскрашивают в соответствии со значениями одного или нескольких ведущих радиоактивных элементов (см. прил. I). Легенду и таблицы рассчитанных статистических параметров распределения радиоактивных элементов в горных породах выносят в заголовочное оформление или представляют на отдельном листе.

I.3.2. Средне- и мелкомасштабные аэroradiogeохимические карты

Исходными материалами для составления аэroradiogeохимических карт среднего и мелкого масштабов могут служить либо карты концентраций (цифровые данные), полученные в процессе собственно аэросъемки среднего (мелкого) масштаба, либо материалы крупномасштабных АГС съемок.

Методика построения аэroradiogeохимических карт по результатам собственно аэросъемки среднего (мелкого) масштаба принципиально не отличается от методики составления аналогичных карт крупного масштаба, изложенной выше.

При составлении средне- и мелкомасштабных аэroradiogeохимических карт по съемкам крупных масштабов предварительно осредняют исходные данные с помощью квадратной сетки. Сетку изготавливают из прозрачного материала (плёнки, восковки). По размерам она должна соответствовать размеру карты или листа геологической государственной съемки. Элементарная ячейка сетки в форме квадрата подбирается так, чтобы ее характеристика по ландшафтным, геологическим и радиогеохимическим признакам была однородной. Обычно эти требования удовлетворяет квадрат со стороной 1 см в масштабе результирующей карты. Для нумерации квадратов используют обозначения, соответствующие каждой ячейке по оси ординат (числовые) и абсцисс (буквенные). Сетку последовательно накладывают на ландшафтную, геологическую (формационную) основы и карты содержаний радиоактивных элементов. После этого для каждой элементарной ячейки считывают и заносят в журнал соответствующие значения геологического, ландшафтного и геохимического признаков. Считывание информации выполняют в строгой последовательности. Если в квадрат попадает два или более геологических и ландшафтных подразделений, то в журнал заносят одно, занимающее большую площадь, и по попавшим в его контур наблюдениям рассчитывают средние для данного квадрата значения концентраций радиоактивных элементов.

Если два контура в элементарном квадрате занимают соизмеримую площадь, то оба заносят в журнал в последовательности, соответствующей направлению считывания, и для обоих определяют средние (в пределах данной ячейки) значения концентраций. По полученным данным для каждого однородного ландшафтно-геологического (формационного) комплекса в соответствии с приемами, изложенными выше, определяют параметры геохимического фона и границы ореолов аномаль-

ных концентраций элементов.

Выделенные ореолы аномальных содержаний группируют в зоны нарушенного распределения радиоактивных элементов с учетом геологического плана района (радиогеохимические зоны привноса и выноса элементов).

По абсолютным величинам геохимического фона радиоактивных элементов и степени неоднородности их распределения намечают границы областей (провинций) различной радиогеохимической дифференцированности.

В работах [18, 23] рекомендуется выделять три группы радиогеохимических провинций: слабо дифференцированные ($V < 50\%$), дифференцированные ($V = 50-70\%$), высокодифференцированные ($V > 70\%$).

В пределах выделенных радиогеохимических провинций (областей) зоны привноса-выноса элементов классифицируют по геохимической специализации (например, торий-урановые, существенно урановые, урано-ториевые, существенно ториевые, урано-калиевые и др.) и по размерам (порядкам) в зависимости от их протяженности и конфигурации (изометричные, линейные).

Зоны первого порядка обычно совпадают с ореолами аномальных концентраций размером в первые сотни км, зоны второго и меньших порядков измеряются десятками км. Им присваивают номер, который ставится внутри контура зои и имеет объяснение в легенде.

Легенда содержит качественную сравнительную оценку перспективности отдельных зон (высоко-, средне-, малоперспективные) и рекомендуемую очередность их изучения. Прогнозные площади выносят на прозрачную накладку к аэрогеохимической карте.

Окончательное оформление и раскраска карты аналогичны упомянутому выше.

Глава 2. МЕТОДИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПОСТРОЕНИЯ РАДИОГЕОХИМИЧЕСКИХ КАРТ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНТЕРПРЕТАТОРА КЛАССИФИЦИРУЮЩЕГО АЭРОГЕОФИЗИЧЕСКОГО (ИКА-2)

2.1. Общие положения

Интерпретатор классифицирующий аэрогеофизический (ИКА-2) применяется для оценки перспективности АГС информации в процессе полета. Он предназначен для работы в комплекте с аэрогеофизической аппаратурой типа ГСА-70, АГС-71 и СКАТ-77

В процессе аэросъемки интерпретатор преобразует и анализирует информацию, поступающую с аэрогамма-спектрометра, и регистрирует на ленте записи заданные сочетания радиогеохимических параметров в виде гистограмм.

С помощью аппаратуры ИКА-2 задача радиогеохимического картирования с выделением повышенных концентраций радиоактивных элементов может решаться оперативно в процессе аэросъемки. Помимо этого, устройство помогает решать и другие геологические задачи: оперативно оценивать перспективность радиоактивных аномалий и полей, выделять потенциально рудоносные участки, аналогичные по сочетаниям концентраций радиоактивных элементов известным в районе эталонным объектам, уточнять геологические границы, например внутри многофазных интрузивных массивов, регистрировать в полете индикаторные параметры (в том числе отношение тория к урану) и др.

Аэрорадиогеохимические карты, построенные с использованием ИКА-2, имеют предварительный характер. Их нельзя полностью отождествлять с аэрорадиогеохимическими картами, построенными в камеральный период, так как на этапе аэросъемки в них не вводятся поправки, учитывающие такие мешающие факторы, как атмосферный радион, величина космического излучения, геоморфологические условия и др. В новой аэрогеофизической станции СКАТ-77 учет радоновых помех и вариаций космического излучения осуществлен автоматически. Для других спектрометров мешающие факторы, влияющие на результаты измерений ИКА-2, могут быть частично учтены при построении карт в камеральный период.

При эксплуатации ИКА-2 необходимо руководствоваться техническим описанием и инструкцией по эксплуатации прибора [15]. Основные технические характеристики интерпретатора ИКА-2 представлены в табл. I, а принцип его работы на функциональной схеме рис. 5.

Таблица I
Основные технические характеристики ИКА-2 *

Наименование	Коли-чество
Входные анализируемые параметры	4
Интервалы квантования:	
а) для трех параметров	16
б) для четвертого параметра	2
Сочетания входных параметров (ячейки памяти ПЗУ)	32
Градации выходного сигнала (информационные группы сочетаний)	8

* Потребляемая мощность от бортсети 27 В. Масса не более 8 кг.

Принцип действия прибора основан на сравнении кодов, представляющих текущие значения параметров, измеряемых аэрогамма-спектрометром, кодами сочетаний параметров, хранящихся в постоянном запоминающем устройстве (ПЗУ) прибора, с целью выделения заданных сочетаний измеряемых параметров. ПЗУ имеет 32 ячейки памяти по 26 двоичных разрядов в каждой. Структура одной ячейки памяти приведена в табл.2.

В каждое сочетание входят коды параметров от А до А+В. Код четвертого параметра может иметь только два значения. Код отношения имеет значение I, когда вычисляется отношение двух параметров.

Функциональная схема прибора приведена на рис.5.

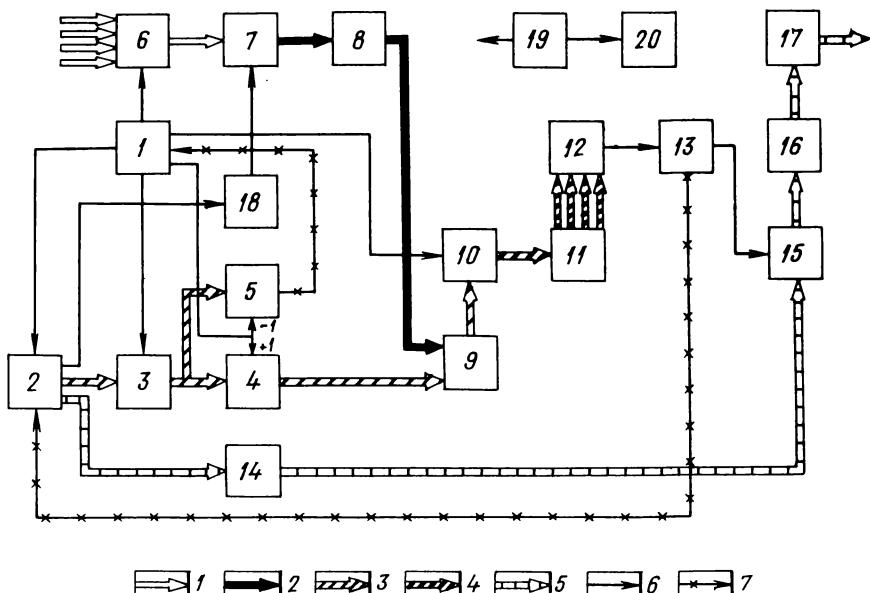


Рис.5. Функциональная схема ИКА-2.

Коммутационные связи по передаче информации и сигналов управления: 1 - мгновенные значения входных параметров; 2 - коды входных параметров; 3 - коды заданных сочетаний; 4 - коды результата сравнения; 5 - коды выходных градаций; 6 - сигналы управления; 7 - сигналы блокировки ПЗУ и окончания досчитывания

Устройство управления I производит циклическое (с циклом 0,25 с) считывание кодов, занесенных в ПЗУ 2. Считывание начинается с первого сочетания. Коды первого параметра и его расширение через коммутатор 3 поступают на регистры 4 и 5 соответственно, а в регистр

Таблица 2

Характер структуры ячейки памяти

Разряд	I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	II	I2	I3	I4	I5	I6	I7	I8	I9	20	21	22	23	24	25	26
Код	A ₁		A ₂		A ₃		A ₄		B ₁		B ₂		B ₃		P		R									

A₁ – A₄ – коды параметров;B₁ – B₃ – коды расширения соответствующих параметров;

P – код перспективности (смысловой признак сочетания);

R – код отношения.

I4 - код входной градации (перспективности) первого сочетания. Одновременно происходит коммутация устройством 6 входного сигнала первого параметра и его кодирование аналого-цифровым преобразователем 7 с передачей кода в регистр 8. Логическое сравнивающее устройство 9 по сигналу от устройства управления сравнивает коды, занесенные в регистры 4 и 8. Затем, если код расширения не равен нулю, то из регистра 5 в устройство управления поступает команда досчитывания. Код в регистре 4 увеличивается, а в регистре 5 уменьшается на единицу. После чего полученный код в регистре 4 снова сравнивается с кодом в регистре 8. Цикл досчитывания прекращается после того, как в регистре 5 значение кода, вследствие вычитания, станет равным нулю.

Если в результате одного из вышеуказанных сравнений коды регистров 4 и 8 совпадут, то через коммутатор 10 в регистре II в первом разряде, который соответствует первому параметру, запишется "1". В противном случае в нем останется "0". Затем устройство управления поочередно анализирует остальные параметры (П, Ш, ИУ) и переходит к анализу следующего сочетания.

При совпадении кодов у всех четырех параметров в каком-нибудь i -м сочетании, в регистре II записывается код "1111", тогда триггер блокировки 13 через устройство совпадения 12 установится в положение "1" и заблокирует выдачу кодов из ПЗУ-2. Коды i -го сочетания будут сохранены в регистрах ПЗУ до конца цикла. Если для данного сочетания полного совпадения нет, то в регистре II и в регистрах ПЗУ (4, 5, I4) будут записаны нули, а затем в них вводятся коды следующего $i+1$ -го сочетания.

В конце каждого цикла, после анализа всех 32^X сочетаний, если триггер блокировки окажется в положении "1", происходит передача кода выходной градации i -го сочетания из регистра I4 через устройство совпадения 15 в выходной регистр I6. В противном случае в регистре I6 останется код "000". Выходной регистр связан с цифро-аналоговым преобразователем I7, с которого напряжение, соответствующее выходной градации совпавшего i -го сочетания, поступает на аналоговый регистратор.

Триггер отношения I8 служит для переключения преобразователя 7 в режим вычисления отношения двух входных величин. При этом числителем является третий параметр, а знаменателем - параметр, который подается на дополнительный вход ИКА-2 - вход "Зи".

Интерпретатор имеет устройство I9 и 20 для контроля и индикации состояний основных регистров 4, 5, 8, I4, I6.

Для использования ИКА-2 необходимо проведение подготовительного этапа, а также настроек и контрольных операций, которые и будут описаны ниже.

2.2. Подготовка АГС данных для использования в аппаратуре ИКА-2

При решении задачи аэорадиогеохимического картирования используется принцип выделения фоновых и аномальных полей по значениям $\bar{q} + 1,3 S$ и $\bar{q} + 3 S$, рассчитываемых для определенных ландшафтно-геологических комплексов. Ограниченные возможности интерпретатора ИКА-2 не позволяют одновременно регистрировать аномальные концентрации по трем элементам в нескольких геологических комплексах. Поэтому выделение аномальных концентраций с помощью аппаратуры ИКА-2 осуществляется преимущественно по одному ведущему и двум вспомогательным элементам. При построении специализированной на ведущий элемент аэорадиогеохимической карты алгоритмом предусматривается определение радиогеохимического типа горных пород по фоновым содержаниям двух вспомогательных элементов с одновременным выделением в их пределах аномальных концентраций ведущего третьего.

В результате реализации алгоритма с помощью аппаратуры ИКА-2 будут выделены аномальные зоны, перспективные на поиски ведущего элемента в определенных ландшафтно-геологических комплексах. Пример составления аэорадиогеохимической карты с помощью аппаратуры ИКА-2 приведен на рис.6.

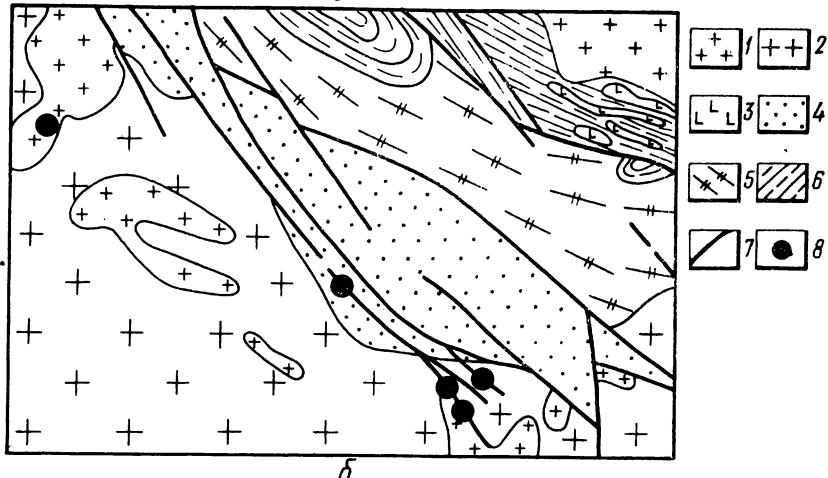
Определение простых индикаторных параметров (отношений двух величин) производится делительным устройством ИКА-2. Более сложные параметры реализуются путем составления групп сочетаний интервалов концентраций элементов, имитирующих данный параметр ($\frac{\bar{q}_K}{\bar{q}_h}$ и др.).

Первичным материалом для составления программы аэорадиогеохимического картирования служат карты концентраций урана (радия), тория и калия в цифровых значениях, полученные по результатам предшествующих АГС съемок на сопряженных площадях или в процессе специальных методических или рекогносцировочных полетов на поисковой площасти.

По цифровым выборкам для каждого геологического комплекса (фациальной, формационной разновидности и т.д.) рассчитываются средние содержания (\bar{q}), стандартные отклонения (S), в случае удов-

0 250 500 750 1000 1250 м

a



b

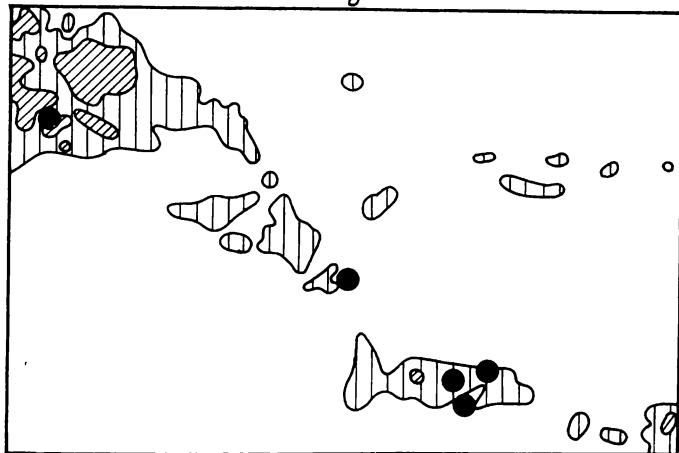


Рис.6. Характер фиксации полями торий-уранового отношения редко-земельного оруденения устройством ИКА-2.

а - геологическая карта: 1 - сиениты, сиенит-порфирь; 2 - граниты; 3 - диабазы; 4 - песчаники; 5 - сланцы; 6 - филлиты; 7 - разломы; 8 - рудные проявления;

б - карта торий-уранового отношения по результатам съемки с ИКА-2; области торий-уранового отношения: 1 - от 4 до 5; 2 - > 5; 3 - рудные проявления

летворения закону нормального распределения, определяются уровни, превышающие средние содержания на $1,3 S$ и $3 S$.

Для надежного распознавания сочетаний устройством классификации необходимо учитывать величины среднеквадратичных флуктуаций (б) по каналам содержаний аэрогамма-спектрометра.

Близкие по радиогеохимическим параметрам элементарные геологические таксоны объединяются в одну группу, если средние значения интервалов концентраций всех трех элементов отличаются не более чем на 2σ .

Выделенные группы пород характеризуются девятью геохимическими параметрами: интервалами концентраций фоновых, повышенных и аномальных значений трех радиоактивных элементов.

В таблице 3 приведен упрощенный пример рассчитанных интервалов концентраций радиоактивных элементов только для двух групп геологических пород в одном из районов.

Из рассчитанных интервалов концентраций радиоактивных элементов, характеризующих геохимический фон выделенных групп пород и аномальных значений (повышенные и аномальные) одного из элементов, составляются информативные сочетания. Они включают в себя интервалы повышенных ($\bar{q} + 1,3 S - \bar{q} + 3 S$) или аномальных ($> \bar{q} + 3 S$) концентраций одного ведущего элемента и интервалы фоновых концентраций двух других (вспомогательных). Каждому информативному сочетанию присваивается свой номер выходной градации (табл.4).

Если интервалы концентраций вспомогательных элементов, свойственные геохимическому фону, принадлежат различным группам пород, но имеют общие значения, то вводится дополнительное граничное условие, которое позволяет разделить породы по одному из элементов с наибольшей вероятностью. Для этого граница между перекрывающимися интервалами проводится обычно по середине интервала общих значений. В нашем примере было принято граничное значение тория, равное $10,3 \cdot 10^{-4}\%$ (табл.4).

В табл.4 № 1, 2 приведены информативные сочетания, с помощью которых выделяют геологические группы пород только по фоновым ($\bar{q} \pm 1,3 S$) концентрациям тория и калия. Для большей надежности картирования составляют вспомогательные информативные сочетания интервалов повышенных концентраций тория и калия в диапазоне $\bar{q} \pm 2 S$ для каждой геологической группы пород (табл.4 № 3-5).

Вспомогательные информативные сочетания объединены в 3 группы: две из них (№ 3, 4) отнесены к соответствующим геологическим комплексам, а третья (№ 5) группа состоит из сочетаний интервалов

Таблица 3

Набор фоновых и аномальных концентраций
радиоактивных элементов (для одного из районов)

№ пп	Название геологических групп	Условные обозначения интервалов	Интервалы концентраций			Тип полей
			Уровн (радий), $10^{-4}\%$	торий, $10^{-4}\%$	калий, %	
1	Вулканическо- терригенные отло- жения нижнего карбона	$\bar{q} \pm 1,3 S$	2,8 ± 4,6	9,1 ± 15,8	2,6 ± 4,2	Геохимический фон
		$\bar{q} + 1,3 S \pm \bar{q} + 3 S$	4,6 ± 5,8	15,8 ± 20,2	4,2 ± 5,2	
2	Терригенные отло- жения среднего девона	$\bar{q} \pm 1,3 S$	>5,8	>20,2	>5,2	Повышенные аномальны
		$\bar{q} + 1,3 S \pm \bar{q} + 3 S$	2,1 ± 3,9	5,6 ± 11,6	1,4 ± 3	
27		$\bar{q} + 1,3 S \pm \bar{q} + 3 S$	3,9 ± 5,1	III,6 ± 15,5	3 ± 4	Геохимический фон
		$\bar{q} + 3 S$	>5,1	>15,5	>4	
						Аномальные

Таблица 4

Информативные сочетания интервалов концентраций радиоактивных элементов для выделения надфоновых полей по Урану
(для одного из районов)

№ пп	Название геологической группы пород	Номера информационных сочетаний	Уран, $10^{-4}\%$	Торий, $10^{-4}\%$	Калий, %	Номер выходной градации	Тип поля по Урану
1	Вулканогенно-терри- генные отложения нижнего карбона	I	4,6±5,8	$10,3\pm15,8$	$2,6\pm4,2$	I	Повышенные аномальные
		2	>5,8	$10,3\pm15,8$	$2,6\pm4,2$	2	
2	Терригенные отложения среднего девона	3	$3,9\pm5,1$	$5,6\pm10,3$	$1,4\pm3,0$	3	Повышенные аномальные
		4	>5,1	$5,6\pm10,3$	$1,4\pm3,0$	4	
		5	3,9	$4,0\pm5,6$	$0,8\pm3,4$	5	
3	Терригенные отложения среднего девона	6	3,9	$5,6\pm10,3$	$0,8\pm1,4$	5	Повышенные аномальные
		7	3,9	$5,6\pm7,3$	$3,0\pm3,4$	5	
		8	3,9	$10,3\pm13,2$	$1,4\pm2,2$	5	
		9	4,6	$7,3\pm10,3$	$3,4\pm4,2$	6	
4	Вулканогенно-терриген- ные отложения нижнего карбона	10	4,6	$10,3\pm15,8$	$4,2\pm4,6$	6	Повышенные аномальные
		II	4,6	$13,2\pm15,8$	$2,2\pm2,6$	6	
		12	4,6	$15,8\pm17,6$	$2,2\pm4,6$	6	
		13	4,6	$7,3\pm10,3$	$3,0\pm3,4$	7	
5	Отложения среднего девона – нижнего карбона	14	4,6	$10,3\pm13,2$	$2,2\pm2,6$	7	Повышенные аномальные

концентраций радиоактивных элементов, которые могут присутствовать в обоих геологических комплексах. Смысловое распознавание этой группы проводится в камеральный период.

Так как вспомогательные информативные сочетания могут откартировать не только заданные, но и не вошедшие в расчеты фациальные разновидности горных пород, им присвоены свои номера выходных градаций. Ввиду ограниченного числа выходных градаций во вспомогательных информативных сочетаниях интервалы повышенных и аномальных концентраций урана (радия) объединены.

2.3. Настройка интерпретатора ИКА-2

Возможны два способа квантования входных параметров.

Первый способ: квантование подлежат только диапазоны концентраций урана (радия), тория и калия, необходимые для составления данного алгоритма. При этом шкала квантования концентраций радиоактивных элементов будет равномерна только в границах квантуемого диапазона и шаг квантования определяется по формуле $\frac{\Gamma_b - \Gamma_n}{n}$, где Γ_n и Γ_b - нижняя и верхняя границы квантуемого диапазона концентраций радиоактивного элемента, n - число основных интервалов квантования, оно постоянно и равно 14.

Например, в табл.4 № 3-5 диапазон концентраций тория - от $4,0 \cdot 10^{-4}\%$ до $17,6 \cdot 10^{-4}\%$, тогда шкала квантования концентраций тория запишется в виде:

нулевой интервал квантования - от 0 до $4,0 \cdot 10^{-4}\%$, интервалы квантования с I по I4 имеют шаг квантования $\frac{17,6 - 4,0}{14} = 0,97 \cdot 10^{-4}\%$,

последний интервал (пятнадцатый) - от $17,6 \cdot 10^{-4}\%$ до верхнего предела шкалы аэрогаммаспектрометра.

Недостатки первого способа квантования: при корректировке или замене алгоритма необходимо изменять шкалу квантования, нельзя работать на разных шкалах спектрометра без подстройки ИКА-2.

Чтобы устранить эти недостатки, на практике чаще применяют второй способ; квантуют диапазоны концентраций радиоактивных элементов, которые известны или могут быть встречены в данном районе работ. При этом шаг квантования для урана (радия) составляет $1 \cdot 10^{-4}\%$, для тория - $2 \cdot 10^{-4}\%$ и для калия - 0,5%.

Шкала квантования концентраций радиоактивных элементов показана в табл.5.

Таблица 5

Шкала квантования радиоактивных элементов
для радиогеохимических полей с кларковыми
концентрациями элементов

Номер интервала квантования	Содержание радиоактивных элементов		
	уран, $10^{-4}\%$	торий, $10^{-4}\%$	калий, %
0	0-1	0-2	0-0,5
I	I-2	2-4	0,5-I,0
2	2-3	4-6	I,0-I,5
...
I4	I4-I5	28-30	7,0-7,5
I5	> I5	> 30	> 7,5

Для спектрометров с увеличенным объемом детектора (25-38 л) шаг квантования для урана (радия) можно уменьшить до $0,5 \cdot 10^{-4}\%$, для тория – до $I \cdot 10^{-4}\%$ и для калия – до 0,25%. Нулевой интервал квантования принимают равным шагу квантования. Недостатком второго способа является более крупный шаг квантования по сравнению с первым, что увеличивает погрешность при переходе от интервалов концентраций радиоактивных элементов к рабочим интервалам. Рабочими интервалами концентраций радиоактивных элементов называются интервалы, набранные квантованными величинами концентрации радиоактивных элементов.

В информативных сочетаниях (таблица 4) граничные значения интервалов концентраций радиоактивных элементов по шкале квантования (таблица 5) заменяют на ближайшие к ним величины уровней квантования и полученные рабочие интервалы (таблица 6) записывают в виде набора порядковых номеров интервалов квантования.

Необходимо отметить, что рабочие интервалы концентраций урана (радия), тория и калия должны быть не меньше 2-3 величин среднеквадратичных погрешностей измерения концентраций соответствующих элементов.

По конструктивным возможностям блока памяти рабочие интервалы могут состоять максимум из восьми интервалов квантования (один по графу "параметр" и до семи по графу "расширение", табл.?). При большем числе интервалов квантования из избыточных набирается дополнительный рабочий интервал, который включается в дополнительное информативное сочетание. Так, в табл.6 в сочетании 2 интервал

Таблица 6
Информативные сочетания, составленные квантованными интервалами концентраций радиоактивных элементов для выделения полей аномальных концентраций ведущего элемента (для одного из районов)

Название геологических групп пород	№ информационных сочтаний	Рабочие интервалы		Квантованные рабочие интервалы		№ выходной градации
		Уран, 10 ⁻⁴ %	Торий, 10 ⁻⁴ %	Уран, 10 ⁻⁴ %	Торий, 10 ⁻⁴ %	
Вулканогенно-терригенные отложения нижнего карбона	1	5-6	10-12	2,5-4	5	5,6,7
	2	>6	10-16	2,5-4	6,7,8,9,10, II, I2, I3	5,6,7
					I4, I5	5,6,7
						5,6,7
Терригенные отложения среднего девона	3	4-5	6-10	I, 5-3	4	3,4
	4	>5	6-10	I, 5-3	5,6,7,8,9,10, II, I2	3,4
					I3, I4, I5	3,4
						3,4,5

Бланк пропозиції

Таблица 7

по урану (радию) более $6 \cdot 10^{-4}\%$ требует объединения десяти интервалов квантования (с 6 по 15 включительно). Поэтому сочетание 2 составляется из двух комбинаций, объединенных в одну выходную градацию.

Составление информативного сочетания двумя комбинациями, как показано в примере, возможно при наличии свободных ячеек памяти ПЗУ. В противном случае уменьшается шаг квантования таким образом, чтобы предельное расширение могло быть достигнуто в рамках одного информативного сочетания.

В данном примере шаг квантования концентраций урана (радия) можно было бы принять равным $0,5 \cdot 10^{-4}\%$, тогда последний (пятнадцатый) интервал квантования включал бы в себя все концентрации урана (радия), начиная от $7,5 \cdot 10^{-4}\%$ и выше, а рабочий интервал более $6 \cdot 10^{-4}\%$ (табл.6 в сочетании 2) можно было бы набрать четырьмя (I2, I3, I4, I5) интервалами квантования.

Для ввода информативных сочетаний интервалов концентраций радиоактивных элементов в запоминающее устройство интерпретатора необходимо заполнить "бланк прошивки" (табл.7).

На основании табл.6 заполняют левую часть "бланка прошивки": в графу "# комбинации" заносят номера информативных сочетаний, причем первому сочетанию присваивают номер нулевой; в графы " I_{II} ", " Π_{II} " и " $\dot{\Pi}_{II}$ " - заносят номера первого (младшего) интервала квантования; в графы " P_I ", " P_{II} ", " P_{III} " - количество интервалов квантования, за исключением первого, входящих в рабочий интервал; в графу " Π " - номера выходных градаций.

Затем эти данные переписывают в правую часть "бланка прошивки", "# комбинации" записывают в графу "ХУ" в восьмиричном коде, а остальные - в двоичном.

Надо отметить, что младший разряд двоичного кода находится слева.

Методика набора платы ПЗУ проста, но требует внимательности.

Плата ПЗУ имеет 26 ферритовых колец, которые соответствуют 26 разрядам "бланка прошивки" и две группы контактов, соответствующие разрядам "Х" и "У". Запись информативного сочетания в постоянное запоминающее устройство производится адресным проводом (ПЭВ-2 Ø 0,15-0,20 мм). Руководствуясь "бланком прошивки" один его конец припаивают к контактам группы "Х", затем проводом прошивают со стороны платы те ферритовые кольца, в которые надо записать "I", и второй конец провода припаивают к контакту группы "У". Число таких адресных проводов соответствует количеству инфор-

мативных сочетаний.

Согласование ИКА-2 с аэрогамма-спектрометром проводится после градуировки спектрометра на полигонных участках для приведения в соответствие выбранных уровней квантования в ИКА-2 с уровнями выходных напряжений каналов содержаний радиоактивных элементов гамма-спектрометра.

С помощью комплекта рудных "моделей" спектрометром поочередно задаются два значения концентраций одного из радиоактивных элементов, которые соответствуют уровням квантования в начале и конце диапазона квантования (например, из табл.5 торий $6 \cdot 10^{-4} \%$ - 3 и торий $26 \cdot 10^{-4} \%$ - I3 - уровни квантования).

Потенциометрами "масштаб" и "сдвиг" методом последовательного приближения устанавливаются на световой индикации коды этих уровней. Эта операция проводится для всех входных параметров.

Для проверки правильности введения программы в ПЗУ после операции согласования потенциометрами "имитатор" необходимо задать на входе интерпретатора информативные сочетания концентраций радиоактивных элементов, а на выходе контролировать соответствующие им выходные градации.

Окончательная проверка работоспособности программы, введенной в ПЗУ, проводится на основании контрольных рекогносцировочных маршрутов над интересующими геологическими объектами. После этого интерпретатор считается настроенным.

При регистрации простых индикаторных параметров, таких как отношение двух величин, в ИКА-2 используется делительное устройство. Для чего на вход "Ш параметр" подается числитель, на дополнительный вход "Зн" - знаменатель и в "бланке прописки" (табл.7) в разряде 26 должна записываться "I", тогда "Ш параметр" будет представлять собой отношение этих двух величин. Обычно простые индикаторные параметры представляются в виде нескользких интервалов, которые наиболее полно отражают распределение радиоактивных элементов в геологических комплексах пород. Так, например, при регистрации торий-уранового отношения для высокорадиоактивных пород используются интервалы 0-I; I-2; 2-5; > 5 или 0-I; I-4; > 4, а для слаборадиоактивных - 0-I; I-I,5; I,5-3; > 3. Интервал квантования для торий-уранового отношения обычно составляет 0,25 или 0,5. По этим данным заполняются табл.5 и 6. Дальнейшая настройка ИКА-2 осуществляется в соответствии с предыдущим текстом.

Более сложные индикаторные параметры ($\frac{U}{Th} K$ и др.) моделируются сочетаниями, которые составляются из интервалов концентра-

ции радиоактивных элементов и интервалов их отношений. Настройка прибора выполняется по методике, описанной выше.

2.4. Применение интерпретатора ИКА-2

При АГС съемке с использованием ИКА-2 необходим периодический контроль работоспособности классифицирующего устройства. Проверка согласования интерпретатора с аэрогамма-спектрометром и набор информативных сочетаний, занесенных в ПЗУ, проводится один раз в месяц. Кроме этого, обязательна проверка согласования каждый раз после ремонта аэрогамма-спектрометра или интерпретатора.

Ежедневно перед началом съемки проверяется общая работоспособность устройства. Для этого с помощью имитатора набираются одно или несколько информативных сочетаний, при этом на ленте записи должны регистрироваться соответствующие им градации выходного сигнала ИКА-2 в виде гистограммы.

Обработка информации проводится на полевом этапе, включающем обработку лент записи спектрометра совместно с классифицирующим устройством и построение первичных карт аномальных концентраций радиоактивных элементов. Во всех считываемых точках берутся одновременно значения по всем каналам содержаний и записи классифицирующего устройства.

При построении карты на схему аэрогеофизических маршрутов, построенную по штурманской или другой оперативной привязке, выносятся отрезки, соответствующие значениям градаций аномальных концентраций урана (ради). Затем оконтуриваются поля аномальных концентраций первой и второй градаций (повышенные и аномальные).

Контуры аномальных полей в изолиниях повышенных и аномальных градаций выносятся на рабочую геологическую карту и анализируются совместно с геолого-геофизическими материалами.

Если сигналом индикаторного параметра оконтуриваются определенные фациальные разновидности горных пород, не представляющие поискового интереса, то соответствующая им комбинация может быть отключена на плате ПЗУ.

Результирующая карта аномальных концентраций по данным ИКА-2 строится в камеральный период по окончательно обработанным и увязанным АГС данным. На ее основе уточняются перспективные участки для постановки последующих наземных работ.

Классифицирующее устройство ИКА-2 испытывалось при АГС поисках урана и аэrorадиогеохимическом картировании областей активизации

щиков древних платформ, в складчатых областях и в депрессионных структурах, сложенных преимущественно терригенными породами.

Результаты опытно-производственного применения ИКА-2 иллюстрируют оперативное выделение ореолов повышенных содержаний радиоактивных элементов при составлении аэорадиогеохимических карт на этапе полевой интерпретации.

На рис.6 показана предварительная аэорадиогеохимическая карта части гранито-гнейсовой купольной структуры, осложненной рядом разрывных нарушений северо-западного простирания, активизированных в различные периоды, вплоть до движений новейшего времени. При настройке бортового устройства ставилась задача выделения полей повышенных отношений тория к урану со значениями более 5.

Бортовое классифицирующее устройство четко выделило поля, тяготеющие к участкам повышенного бластеза пород и проявления гидротермальных процессов (ортоклазиты, кварц-флюорит-карбонатные метасоматиты), сопровождающиеся привносом калия, тория и контролирующие мелкие тела сиенит-порфиров с редкоземельным оруднением.

При аэропоисках в ряде районов складчатых областей с помощью аэорадиогеохимической карты, построенной ИКА-2, удалось конкретизировать перспективные участки в приконтактовой зоне специализированных на уран гранитоидных массивов лейкогранитовой и щелочно-гранитовой магматических формаций.

На рис.7 показана предварительная аэорадиогеохимическая карта. Тест для решения поставленной задачи представлял собой набор рабочих сочетаний, объединенных в информативные группы интервалов концентраций урана $6\text{--}8 \cdot 10^{-4}\%$ и более $8 \cdot 10^{-4}\%$, при фоновых концентрациях тория $12\text{--}15 \cdot 10^{-4}\%$ и калия 3-4%. Выбранными сочетаниями выделены ореолы рассеяния урана вблизи всех известных проявлений урана.

На рис.8 показана аэорадиогеохимическая карта проявления стратiformного оруднения уран-силикатно-ванадиевого типа минерализации. При настройке классифицирующего устройства в него были введены концентрации урана (радия) в интервалах $5,5\text{--}6,5 \cdot 10^{-4}\%$ и более $6,5 \cdot 10^{-4}\%$ при фоновых концентрациях тория ($6\text{--}15 \cdot 10^{-4}\%$) и калия (1,2-3,5%). Устройство позволило четко выделить большинство известных рудоносных пластов и локализовать новый участок в юго-западной части площасти, рекомендованный для постановки поисковых работ.

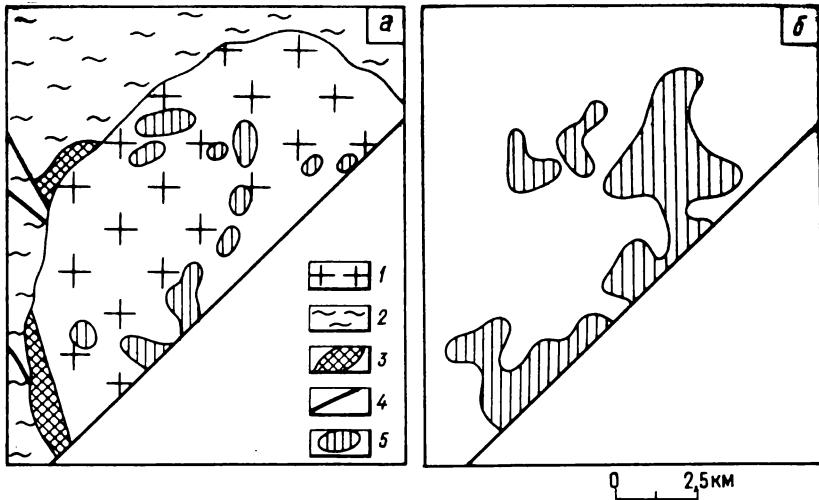


Рис.7. Результаты аэrorадиогеохимического картирования гранитной интрузии вручную и с помощью бортового классифицирующего устройства.

а - схематическая геологическая карта с аномальными полями урана (радия), выделенными вручную по АГС данным; б - карта аномальных полей урана по данным ИКА-2; 1 - граниты; 2 - метаморфические породы; 3 - скарп; 4 - разломы; 5 - аномальные поля урана

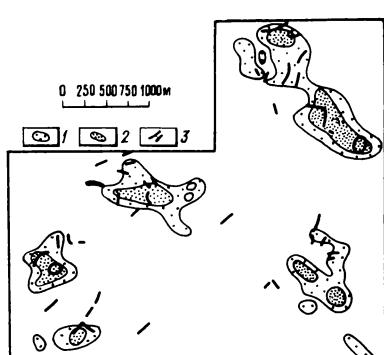


Рис.8. Использование устройства ИКА-2 для аэrorадиогеохимического картирования осадочных пород со стратифицированным оруднением.

Аномальные аэrorадиогеохимические поля урана по данным АГС съемки с ИКА-2: 1 - повышенные (от 5,5 до $6,5 \cdot 10^{-4}$); 2 - аномально-высокие ($> 6,5 \cdot 10^{-4}$); 3 - рудоносные пласти осадочных пород

Отмечается хорошее совпадение контуров повышенных и аномальных полей урана (радия), выделенных ИКА-2 с данными ручной обработки. На рис.9 показано выделение уран-фосфорного типа оруденения по полям повышенных концентраций урана с помощью приставки (ИКА-2).

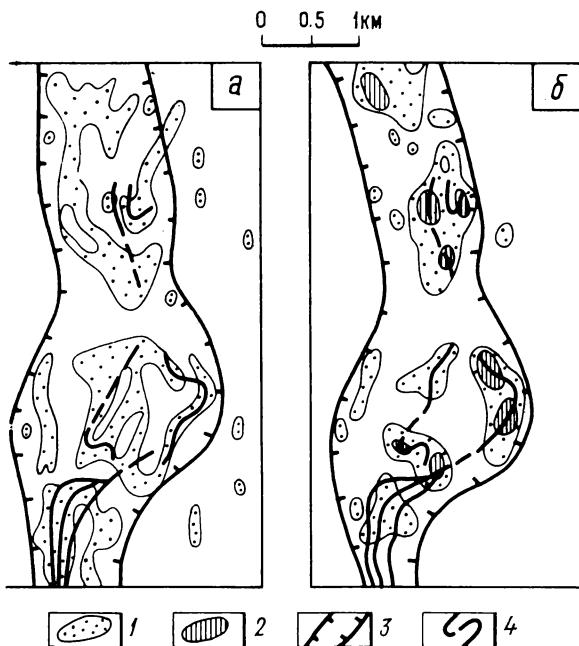


Рис.9. Карта аномальных аэrorадиогеохимических полей урана по данным съемки с ИКА-2 (а) и ручной обработки АГС данных (б). Аномальные аэrorадиогеохимические поля урана: 1 - повышенные; 2 - аномально высокие; 3 - границы аэrorадиогеохимических зон; 4 - горизонты осадочных пород со стратиформенным фосфатным оруденением

Глава 3. МЕТОДИКА АЭРОРАДИОГЕОХИМИЧЕСКОГО КАРТИРОВАНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭЗМ

Процесс построения аэrorадиогеохимических карт, основанный на анализе большого количества цифровой информации, может быть автоматизирован с использованием средств электронно-вычислительной техники. Исходными данными при этом являются материалы аэроизмерений, закодированные аэрогеофизическими цифровыми регистраторами (РЦАГ-16, КД-77, РУМС-2000, МСС-214 и др.) на любых видах носителей информации, предусмотренных в системах АСОМ/ЕС, АСОАГ, АСОД "Аэрокомплекс", а также дополнительные сведения о привязке измерений, геологическом и ландшафтном строении территорий, кодируе-

мые с помощью стандартных устройств ЭВМ или специальными полуавтоматами (типа "Шифратор" и др.).

Рассмотрено два подхода к автоматизированному построению аэро радиогеохимических карт. В первом (раздел 3.1) задача выделения перспективных площадей формулируется как локализация областей с повышенными (аномальными) содержаниями радиоактивных элементов по сравнению с геохимическим фоном, рассчитанным для выделенных однородных ландшафтно-геологических подразделений (таксонов). Такой подход наиболее целесообразен при крупномасштабных аэропоисковых работах для районов с достаточно хорошей степенью геологической изученности территорий (государственные геологические съемки м-ба 1:50 000 и т.д.). В то же время, несмотря на автоматизацию большей части операций, эта методика предполагает еще значительный объем трудоемких "ручных" операций (подготовка и кодирование геолого-ландшафтной информации, перенос радиогеохимической нагрузки на геолого-формационную основу) и поэтому может быть реализована только после завершения полевых работ на камеральном этапе интерпретации.

Во втором подходе (раздел 3.2) не требуются априорные сведения о геологическом строении территории. Аэорадиогеохимическое картирование с выделением перспективных площадей может быть выполнено на этапе полевых работ в процессе текущей (позвылетной) обработки аэроданных. Для выделения перспективных площадей наряду с повышенными (аномальными) содержаниями радиоактивных элементов привлекаются данные о структуре связей между элементами в аномальной составляющей поля. Задача выделения перспективных площадей формулируется как локализация областей с повышенными (аномальными) содержаниями и маловероятными для неизмененных горных пород взаимосвязями регистрируемых параметров. Такой подход наиболее целесообразен при среднемасштабных аэропоисковых работах, успешно применяется он и при крупномасштабных съемках.

3.1. Автоматизированное построение аэорадиогеохимических карт на геолого-ландшафтной основе

В общем виде полный цикл обработки АГС данных с целью построения аэорадиогеохимической карты предполагает последовательное выполнение следующих операций:

а) ввод в память ЭВМ АГС и геодезических данных, закодированных в ходе съемки цифровым аэрогеофизическим регистратором

- (РУМС-2000, РЦАГ-16 или КД-77) на полевых носителях информации;
- б) поэтапную обработку введенной порции АГС данных (обычно полученных по одному-двум вылетам) комплектом обрабатывающих программ (устранение сбоев, расчет и введение поправок, сглаживание флюктуационных помех, выделение локальных аномалий, интерполяция в узлы прямоугольной сети и т.д.);
 - в) объединение связанных между собой по секущим и повторным маршрутам результатов предварительной обработки отдельных вылетов (в виде числовых массивов интерполированных значений поля в узлах прямоугольной сети) в единый для всей площади числовой массив геохимических данных;
 - г) кодирование на перфоленте (перфокартах) и ввод в память ЭВМ пространственно-упорядоченных геолого-формационных и ландшафтных данных;
 - д) формирование выборок из значений поля в пределах каждого геохимически однородного геолого-ландшафтного таксона;
 - е) статистическая обработка полученных выборок, включающая в себя оценку соответствия эмпирического распределения определенному математическому закону, вычисление и печать граничных значений для фоновых и аномальных (маловероятных для данной совокупности) концентраций радиоактивных элементов;
 - ж) выявление пространственно-сопряженных точек наблюдения с фоновыми, повышенными и аномально высокими концентрациями элементов и вывод окончательных результатов обработки АГС данных через внешние устройства ЭВМ (алфавитно-цифровое печатающее устройство - АЦПУ или графопостроитель "Атлас") в виде аэrorадиогеохимических карт заданного масштаба.

Пункты (а-в) выполняются в ходе предварительной обработки АГС информации в соответствии с инструкциями по эксплуатации используемой автоматизированной системы обработки аэроданных и не требуют специальных пояснений.

Особенности методики составления аэrorадиогеохимических карт на ЭВМ обусловлены, главным образом, необходимостью автоматизации операций формирования и статистического анализа максимально представленных по объему выборок из однородных по геолого-ландшафтным и геохимическим характеристикам совокупностей. Кроме того, применение ЭВМ позволяет использовать для оценки параметров эмпирических распределений трудоемкие, но более строгие вычислительные процедуры.

Исходными картографическими материалами для ввода в ЭВМ информ-

мации о детальном геологическом и ландшафтном строении изучаемой территории являются геолого-формационные и ландшафтные карты, отвечающие перечисленным в разделе I.2 требованиям, карта локальных аномалий, а также выполненная на прозрачном материале схема расположения узлов регулярной (обычно прямоугольной) сети, которая отражает пространственную привязку предварительно обработанной АГС информации.

В соответствии с легендой к картам каждой литологической (формационной) разновидности и каждому типу элементарных ландшафтов присваивается свой числовый код (классификатор), например: элювиальный ландшафт - 1, трансэлювиальный - 2, субаквальный - 3 и т.д.; известняк - 1, песчаники среднезернистые - 2 и т.д. Локальные аномалии, выделенные специальной программой АСОД в процессе предварительной обработки АГС информации, исключаются из значений поля, используемых в дальнейшем для расчета параметров нормально-го геохимического фона, так как они обусловлены, как правило, факторами (геолого-минералогический состав, тип элементарного ландшафта, условия измерений и т.д.), чуждыми для изучаемой совокупности неизмененных горных пород. С этой целью им присваивается любой "свободный" классификатор по одному из признаков.

По каждой строке прямоугольной сетки узлов интерполяции определяют координаты (номер строки и позиции) начала и конца всех встреченных на ней геологических и ландшафтных подразделений. Полученные сведения вместе со значениями соответствующих классификаторов кодируют на перфоленте (перфокартах) и вводят в память ЭМ в качестве исходных данных для описания каждого узла по геологическому и ландшафтному признакам. Дальнейшие операции по формированию радиогеохимически однородных выборок и вычислению их статистических параметров производятся системой автоматически.

АГС данные, относящиеся к узлам сети с одинаковыми парами геологического и ландшафтного классификаторов, объединяются по всей площади участка в единую статистическую совокупность (выборку), однородность которой оценивается аналитически с помощью критерия Диксона-Мэсси [22] и визуально по выводимым через АЦПУ ЭМ гистограммам плотности распределения значений концентраций урана, тория и калия. При значительной асимметрии выборочного распределения устанавливается причина неоднородности исходных данных привлечением дополнительных материалов (в первую очередь, всех доступных сведений по гидротермальным изменениям пород) и формируется новое признаковое пространство.

Для оценки согласия эмпирических данных конкретной математической модели принят критерий χ^2 Пирсона [II], который не зависит от вида функции распределения и представляет собой следующую сумму:

$$\chi_B^2 = \sum_{i=1}^m \frac{(n_i - n'_i)^2}{n'_i}, \quad (3.1)$$

где i - номер интервала; n_i - число наблюдений, попавших в i -й интервал; n'_i - теоретическое число наблюдений для i -го интервала, вычисленное, исходя из распределения, согласованность с которым проверяется; m - число интервалов.

Если предполагаемое распределение не противоречит эмпирическим данным, то случайная величина χ^2 будет распределена по закону Пирсона с $m-\ell$ степенями свободы, где ℓ - число наложенных связей. При радиохимических построениях обычно ограничиваются аппроксимацией эмпирического распределения нормальной или логнормальной моделью, для которых $\ell = 3$.

Проверяемая гипотеза отвергается, когда вычисленная по формуле 3.1 величина χ_B^2 превышает максимально допустимое значение $\chi_{p,m-\ell}^2$ при заданном уровне значимости p и $m-\ell$ степенях свободы.

Оптимальная ширина интервалов для каждой выборки рассчитывается по формуле Стерджесса

$$d = \frac{q_{\max} - q_{\min}}{1 + 3.3 \rho \sqrt{n}}, \quad (3.2)$$

где d - ширина интервала; q_{\max} - максимальная концентрация элемента в выборке; q_{\min} - минимальная концентрация элемента в выборке; n - объем выборки.

Для вычисления теоретических частот по каждому интервалу находят

$$t_i = \frac{q_i - \bar{q}}{S}, \quad (3.3)$$

где q_i - концентрация элемента в середине i -го интервала; \bar{q} - среднее арифметическое; S - стандартное отклонение.

Отсюда, теоретическое число наблюдений в i -м интервале в случае справедливости гипотезы о нормальном распределении определяется как

$$n'_i = \frac{n d_i}{\sigma} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{t_i^2}{2}\right), \quad (3.4)$$

где n - объем выборки; d_i - ширина интервала, вычисленная по формуле 3.2.

Аналогично, переходя от натурального масштаба записи АГС информации к логарифмическому, можно оценить соответствие эмпирического распределения логнормальному закону.

Известно [6], что в случае нормального распределения состоятельной, эффективной и несмещенной оценкой истинного среднего является среднее арифметическое

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n q_j, \quad (3.5)$$

а дисперсия - второй центральный несмещенный момент

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (q_j - \bar{q})^2. \quad (3.6)$$

При логнормальном распределении с величиной коэффициента вариации (V) выше 115% наиболее эффективными оценками среднего и дисперсии (особенно по малым выборкам с $n < 100$) являются максимально правдоподобные оценки Ачисона и Брауна [6]

$$\hat{a} = \exp(\bar{\ln} q) \Psi(1/2 S_{\ln q}^2), \quad (3.7)$$

$$\hat{S}^2 = \exp(2 \bar{\ln} q) \left[Y_n(2 S_{\ln q}^2) - \Psi\left(\frac{n-2}{n-1} S_{\ln q}^2\right) \right], \quad (3.8)$$

где $Y_n(t) = \exp(t) \left[1 - \frac{t(t+1)}{n} + \frac{t^2(3t^2+22t+21)}{6n^2} + O\left(\frac{1}{n^3}\right) \right]$;

$$t = \frac{1}{2} S_{\ln q}^2;$$

$O\left(\frac{1}{n^3}\right)$ является обозначением величины, имеющей порядок $\frac{1}{n^3}$;

$\bar{\ln} q = \frac{\sum_{i=1}^n \ln q_i}{n}$ - среднее арифметическое логарифмов содержаний;

$$S_{\ln q}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\ln q_i - \bar{\ln q})^2}{n-1} - \text{дисперсия логарифмов содержаний.}$$

Учитывая это, в зависимости от неоднородности распределения эмпирическая оценка истинного среднего и дисперсии производится соответственно по \bar{q} , S или \hat{a} и \hat{S} . Однако необходимо иметь в виду, что статистики \hat{a} и \hat{S} дают выигрыш в точности только в том случае, если истинное распределение генеральной совокупности действительно является логнормальным [26]. Следует также учитывать, что при использовании АИС данных распределения с

$V > 115\%$ встречаются только на стадии детальных радиохимических исследований при изучении гидротермально измененных пород. При более мелком масштабе аэродиагеохимических построений такая величина коэффициента вариации свидетельствует, как правило, о неоднородности изучаемой совокупности и необходимости выявления и устранения обусловивших ее причин.

Распределение случайных величин \bar{q} , S , \hat{a} и \hat{S} с возрастанием объема выборки стремится к нормальному закону при любом распределении самих случайных величин. Отсюда, доверительные интервалы, в которых с надежностью $1-p/2$ заключены истинное среднее значение и стандартное отклонение концентраций радиоактивного элемента в какой-либо геологического-ландшафтной разности, вычисляются для нормального (логнормального) законов по формулам

$$\begin{aligned} \bar{q} &\pm \frac{t_{1-p/2} S_q}{\sqrt{n}} ; \quad S_q = \frac{t_{1-p/2} S_q}{2} ; \\ \hat{a} &\pm \frac{t_{1-p/2}}{\sqrt{n}} \sqrt{S_{\ln q}^2 + \frac{1}{2} S_{\ln q}^4} ; \\ \hat{S}^2 &\pm \frac{t_{1-p/2} \hat{a}^2}{\sqrt{n}} \sqrt{4 S_{\ln q}^2 V^4 + 2 S_{\ln q}^4 (2V^2 + 1)^2}, \end{aligned} \quad (3.9)$$

где $V^2 = [\exp(S_{\ln q}^2) - 1]$ – коэффициент вариации в долях единицы; $1-p/2$ – квантиль нормированного нормального распределения; p – уровень значимости.

Если выборочное распределение аппроксимируется нормальным законом, вычисление пороговых значений аномальных и аномально высоких (низких) концентраций производится по формулам I.1 и I.3. В случае логнормального распределения осуществляется переход от натурального масштаба записи содержаний радиоактивных элементов к логарифми-

ческому и граничные значения фоновых и аномальных концентраций определяют соответственно как

$$\bar{U}_{\text{ng}} \pm 1,3 S_{\text{eng}} \quad \text{и} \quad \bar{U}_{\text{ng}} \pm 3 S_{\text{eng}}.$$

Результаты статистической обработки выборочных данных с помощью АЦПУ ЭВМ оформляют в виде самостоятельной таблицы, в которой для каждой выборочной совокупности указывается соответствующий код (геологический и ландшафтный классификатор), объем выборки, теоретический закон, которому не противоречит распределение рассчитанных концентраций урана, тория, калия (нормальный или логнормальный), среднее арифметическое и медиана содержаний радиоактивных элементов, граничные значения фоновых и аномальных концентраций, коэффициент вариации.

На основе совместного анализа ландшафтных, геологических, АГС и статистических данных все наблюдения в пределах каждого выделенного таксона (включая и отдельные аномальные значения, не входившие в выборочную совокупность при расчете параметров геохимического фона), подразделяются, в соответствии с принятыми формальными правилами, на фоновые, повышенные и аномально высокие. Результаты выполненного анализа через внешние устройства ЭВМ (АЦПУ или графопостроитель "Атлас") выводятся в виде монозлементной прогнозно-геохимической нагрузки аэрорадиогеохимической карты заданного масштаба отдельно для урана, тория и калия.

При печати знаковой модели карты на АЦПУ ЭВМ единый для всех геолого-ландшафтных совокупностей символ присваивается точкам наблюдения с повышенными концентрациями (от $\bar{U} + 1,3 S$ до $\bar{U} + 3 S$) и, аналогично, другим общим символом отмечаются все аномально высокие содержания (более $\bar{U} + 3 S$). Области пониженного (от $\bar{U} - 1,3 S$ до $\bar{U} - 3 S$) и аномально низкого (с концентрациями менее $\bar{U} - 3 S$) геохимического поля также печатают едиными для всех совокупностей символами. Градации изолиний нормального фона выбираются в соответствии с методикой, изложенной в разделе I.3. Геохимическая информация с полученных на АЦПУ ЭВМ распечаток переносится на геолого-информационную основу. Дальнейшие операции по оформлению и раскраске аэрорадиогеохимической карты выполняются, как указано в разделе I.3.

3.2. Автоматизированное построение аэорадиогеохимических карт на основе компонентного анализа АГС данных

Специфика поведения радиоактивных элементов в процессах породо- и рудообразования создает благоприятные предпосылки для экспресс- ского автоматизированного выделения перспективных площадей на основе информации об особенностях распределения и взаимосвязей элементов, закодированной на магнитную или перфорационную ленту непосредственно в ходе АГС съемки.

Как показывают многочисленные исследования, в большинстве горных пород и продуктов их дезинтеграции по мере изменения уровня общей радиоактивности пропорционально изменяются и кларковые концентрации урана, тория и калия. Поэтому, хотя фоновое АГС поле представляет собой совокупность радиогеохимически разнородных участков с резко различными статистическими параметрами, вариации литологического состава коренных пород, генетического типа и мощности рыхлых образований приводят, как правило, к закономерному изменению интенсивности спектра гамма-излучения во всем диапазоне регистрируемых энергий. Причем, значительная трансформация (осреднение) реального геохимического поля при АГС съемке позволяет удовлетворительно аппроксимировать свойственный неизмененным горным породам характер взаимосвязи между средними значениями измеряемых параметров линейной моделью (рис.10, табл.8).

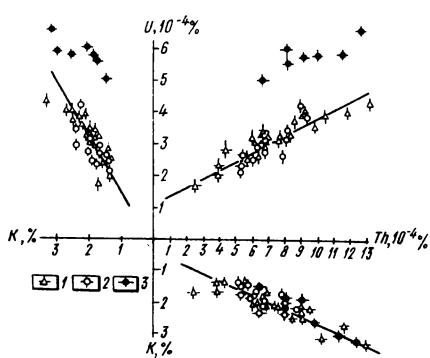


Рис.10. Диаграммы распределения урана, тория и калия в горных породах и элементарных ландшафтах одной из аридных зон.

Элементарные ландшафты:
1 - эловиальный; 2 - трансэлювиальный; 3 - ореолы рассеяния рудных месторождений ирудопроявлений

Согласно исследованиям Л.А.Верховской [9] для заведомо неоднородной геохимической ассоциации величина коэффициента линейной

Таблица 8

Средние содержания радиоактивных элементов в горных породах
одного из районов аридной ландшафтно-климатической зоны
(по данным АГС съемки масштаба 1:25 000 с прибором ГСА-70 В)

Наименование и возраст пород	Ландшафт						
	Эловиальный			трансэловиальный			
$\bar{q} \cdot 10^{-4} \%$	$\bar{q}_2 \cdot 10^{-4} \%$	$\bar{q}_3 \cdot 10^{-4} \%$	$\bar{q} \cdot 10^{-4} \%$	$\bar{q}_2 \cdot 10^{-4} \%$	$\bar{q}_3 \cdot 10^{-4} \%$	$\bar{q}_3 \cdot 10^{-4} \%$	
Песчаники, аргиллиты, известняки	129	3,9	9,0	2,1	200	4,2	8,8
Песчаники, конгломераты, алевролиты	161	3,5	9,7	2,2	104	3,4	8,0
Песчаники, алевролиты	31	3,2	6,9	1,7	-	-	-
Песчаники, алевролиты	95	4,0	11,7	2,7	32	2,6	7,8
Песчаники, алевролиты, туфриты	179	4,3	13,1	3,3	-	-	-
Песчаники, туфриты, алевролиты	186	4,0	11,3	3,6	78	2,7	6,7
Конгломераты, песчаники, гравелиты	150	3,2	7,6	2,1	49	2,4	5,9
Песчаники, гравелиты, конгломераты	91	3,9	10,3	3,1	80	3,1	6,7
Песчаники, алевролиты	71	3,7	8,5	2,5	35	2,4	5,8
Конгломераты, песчаники, гравелиты	175	2,6	6,3	1,6	80	2,1	5,2
Песчаники, конгломераты, гравелиты	125	3,3	8,2	2,2	70	3,1	8,0
Песчаники, гравелиты, алевролиты	146	3,8	9,1	2,3	63	2,9	6,1
Конгломераты, гравелиты, песчаники	94	3,3	6,4	2,0	-	-	-
Изварцевые порфирь, конгломераты	222	3,1	7,0	2,1	100	3,1	6,7
Нерасщлененные эфузивы	51	2,9	6,7	1,8	-	-	-
Изварцевые порфирь	64	4,0	9,1	2,5	-	-	-
Англезитовые порфириты	32	6,6	3,4	1,8	-	-	-

Продолжение табл.8

Наименование и возраст пород	Ландшафт					
	r_2	$\bar{q}_1 \cdot 10^{-4} \%$	$\bar{q}_2 \cdot 10^{-4} \%$	$\bar{q}_3 \cdot 10^{-4} \%$	n	$\bar{q} \cdot 10^{-4} \%$
аллювиальный						
Турфобрекции, порфириты	164	3,0	6,1	2,0	70	2,3
Песчаники, алевролиты, конгломераты	45	2,5	5,6	1,3	47	2,6
Известники, алевролиты, песчаники	155	3,1	7,5	2,1	71	2,9
Вулканогенные конгломераты, диабазы	44	1,3	2,0	1,8	-	-
Аргиллиты, песчаники, известняки	200	1,7	2,5	1,7	-	-
Граниты, гранит-порфирь	38	3,2	5,9	2,1	-	-
Габброиды	39	2,8	4,3	1,4	-	-
Кварцевые порфирь	109	3,4	6,7	2,0	-	-
Диабазы	37	2,0	3,9	1,4	-	-
Диориты	31	2,3	3,9	1,7	-	-
трансэоловальный						

Таблица 9

Парные коэффициенты корреляции,
рассчитанные с шагом 500 м по результатам АГС съемки
масштаба 1:25 000 фоновых и рудных участков

Номер участка	Коэффициенты корреляции			Характеристика объекта исследования
I	-0,02	-0,09	0,16	Рудное поле месторождения настурган-сульфидного типа (гумидная горно-таежная зона)
2	0,14	0,00	0,44	
3	-0,31	-0,44	0,49	
4	-0,26	-0,26	0,62*	
5	-0,05	-0,14	0,69*	
6	0,08	0,23	0,14	
7	0,27	0,03	0,46	
8	0,50*	0,46*	0,72*	Неизмененные метаморфические породы (гумидная горно-таежная зона с явлениями криогенеза)
9	0,59*	0,30*	0,35*	
I0	0,66*	0,41*	0,43*	
II	0,79*	0,40*	0,53*	
I2	0,54*	0,52*	0,62*	Неизмененные вулканогенно-осадочные породы (семиаридная степная зона)
I3	0,74*	0,75*	0,84*	
I4	0,68*	0,59*	0,75*	
I5	0,58*	0,62*	0,73*	
I6	0,54*	0,53*	0,69*	

* Коэффициент корреляции значительно отличен от нуля при $\rho = 0,01$ (критерий Фишера).

корреляции отражает, в основном, синхронность в поведении элементов при переходе из одной генеральной совокупности в другую, и в меньшей степени зависит от статистической корреляции в каждой однородной выборке. В соответствии с этим, характеристикой фонового состояния радиогеохимического поля являются высокие (вследствие отмеченной выше пропорциональной изменчивости кларков) значения коэффициентов парной корреляции между данными каналов блока содержаний аэрогамма-спектрометра [19].

Наложенные, в том числе и рудные, процессы приводят к существенному перераспределению радиоактивных элементов, которое проявляется в изменении их первоначальных концентраций и, как следствие, в нарушении линейности характера взаимосвязей (рис.10, табл.9).

Следовательно, задачу аэрогеохимического картирования можно сформулировать, как "локализация областей с маловероятными для неизмененных пород значениями и корреляциями регистрируемых параметров". Для решения поставленной задачи в каждой точке наблюдения необходимо выделить фоновую составляющую со структурой связи между элементами, характерной для неизмененных пород, и оценить степень соответствия ее реально наблюданной.

Предлагаемый подход реализуется в обратной задаче факторного анализа [5]. Рассмотрим соответствие структуры регистрируемого геохимического поля факторной модели.

В общем виде вектор измеренных в i -й точке пространства значений АГС признаков $\varphi_i = \{\varphi_u, \varphi_{Th}, \varphi_K\}_i$ можно представить как сумму двух основных слагаемых

$$\varphi_i = \varphi_i^{(0)} + \Delta \varphi_i, \quad (3.10)$$

где $\varphi_i^{(0)} = \{\varphi_u^{(0)}, \varphi_{Th}^{(0)}, \varphi_K^{(0)}\}_i = \varphi_i^{(0)}$ - вектор фоновых ("породных") составляющих содержаний урана, тория и калия со структурой связей между элементами, свойственной неизмененным горным породам;

$\Delta \varphi_i = \{\Delta \varphi_u, \Delta \varphi_{Th}, \Delta \varphi_K\}_i = \varphi_i^{(0)} + \varphi_i^{(1)} + \dots + \varphi_i^{(\sim)} + \dots + \varphi_i^{\infty}$ - вектор значений аномальных составляющих исходных признаков, обусловленных совокупностью некоторого конечного ($\sim - I$) числа наложенных процессов; \sim - общее число независимых геологических процессов (факторов), участвовавших в формировании современного облика наблюданной геохимической системы.

Если $f_{ui}, f_{Thi}, \dots, f_{Ki}, \dots, f_{ri}$ - количественные характеристики соответствующих природных факторов в i -й точке пространства, то для любой K -й составляющей j -го элемента вектора исходных признаков $\varphi_j^{(k)}$ имеем

$$q_{ji}^{(k)} = \psi_k(f_{ki}).$$

Тогда, для j -ого элемента уравнение 3.I0 можно переписать, как:

$$q_{ji} = \psi_1(f_{1i}) + \Delta q_{ji} = \psi_1(f_{1i}) + \psi_2(f_{2i}) + \dots + \psi_k(f_{ki}) + \dots + \psi_r(f_{ri}) \quad (3.II)$$

Из этого следует, что для разложения исходного радиогеохимического поля на фоновую и аномальную (наложенную) составляющие, необходимо и достаточно знать величину первого ("породного") фактора f_{1i} и вид функции связи ψ_1 его с измеренными переменными q .

В работах [17, 24] показано, что общим свойством любой парагенетической ассоциации (как породной, так и рудной) является линейный характер связей между ее компонентами, отклонения от которого возникают только на месте пересечения нескольких различных по природе парагенезисов. То есть наличие линейной или квазилинейной зависимости между какими-либо наблюдаемыми параметрами можно рассматривать как свидетельство их общей генетической природы или следствие единой причины, интенсивной характеристике которой они пропорциональны. Это значит, что влияние реальных геологических процессов на формирование облика изучаемого объекта удовлетворительно можно оценить с помощью независимых линейных комбинаций (ψ') измеренных переменных.

Как уже отмечалось, по аэроданным зависимость между содержаниями урана, тория и калия для неизмененных горных пород хорошо согласуется с линейной моделью. Следовательно, представляется корректным предположение о линейности функции связи ψ_1 "породного" фактора с измеряемыми переменными. Полагая линейными все ψ_k , из уравнения 3.II имеем

$$q_{ji} = \omega_{j1}f_{1i} + \Delta q_{ji} = \omega_{j1}f_{1i} + \omega_{j2}f_{2i} + \dots + \omega_{jk}f_{ki} + \dots + \omega_{jr}f_{ri} = \quad (3.I2)$$

где ω_{jp} - коэффициент пропорциональности между величиной p -го фактора и значением i -го параметра.

Полученные уравнения 3.I2 аналогичны основным уравнениям метода главных компонент [27]

$$\hat{Q} = WF,$$

где $W = [\omega_{jp}]$ - матрица факторных нагрузок (размерности $m \times r$); $F = [f_{pi}]$ - матрица значений факторов ($r \times n$); $\hat{Q} = [\hat{q}_{ji}]$ - мат-

рица нормированных значений наблюдаемых переменных ($m \times l$); m - число наблюдаемых переменных (параметров); l - число наблюдений ($l > m$); r - ранг корреляционной матрицы R , равный числу линейно независимых исходных переменных ($r \leq m$); $j = 1, 2, \dots, m$; $p = 1, 2, \dots, r$; $i = 1, 2, \dots, l$.

Следовательно и вычислительные процедуры МГК могут быть использованы для решения конкретных геологических задач, сформулированных в терминах построенной факторной модели радиогеохимического поля.

Анализируя внутреннюю структуру ковариационной (V) или корреляционной (R) матрицы, МГК заменяет вектор зависимых случайных величин $\vartheta = (\vartheta_1, \vartheta_2, \dots, \vartheta_m)^*$ размерности m вектором независимых случайных величин $f = (f_1, f_2, \dots, f_r)$ размерностью $r \leq m$ путем нахождения для исследуемой матрицы собственных векторов и собственных чисел, по величинам которых и вносятся, в дальнейшем, суждение о существенности влияния новых переменных – факторов f как в целом на исходный вектор ϑ , так и на отдельные его компоненты.

Геометрически этот процесс представляет собой переход к новой ортогональной системе координат, оси которой совпадают с основными направлениями изменчивости анализируемой выборки по комплексу признаков и называются главными компонентами.

Проекции описания изучаемых объектов на компонентные оси называются значениями главных компонент и служат стандартной мерой отличия данного объекта (наблюдения) от среднего по соответствующей новой переменной.

Аналитически главные компоненты являются некоррелированными между собой линейными комбинациями исходных параметров, т.е. в соответствии с выражением З.12, могут быть использованы для описания реальных геологических процессов.

Содержательная интерпретация главных компонент производится по их признаковой структуре, т.е. по знакам и абсолютным величинам нагрузок АГС параметров, входящих в эти компоненты.

Математический аппарат МГК позволяет определить число независимых факторов, сформировавших зарегистрированный АГС съемкой облик изучаемого объекта, оценить их по степени значимости и вы-

* В дальнейшем, вектор-столбец обозначается строчной латинской буквой без штриха, а вектор-строка – строчной буквой со штрихом.

делить наиболее существенные, рассчитать факторные нагрузки на каждую переменную и значения факторов в любой точке наблюдения (прямая задача факторного анализа [5]). Полученные данные можно использовать затем для решения обратной задачи - восстановление облика исследуемой динамической системы, сформированного воздействием любого сочетания выделенных на первом этапе факторов.

В соответствии с поставленной задачей необходимо воссоздать характер поля концентраций радиоактивных элементов, обусловленный совокупностью наложенных процессов. Из выражения 3.10 получаем

$$\Delta g_i = g_i - \gamma_i(f_{ii}). \quad (3.13)$$

Степень отличия элементов вектора Δg_i от нуля пропорциональна интенсивности изменения фонового состояния АГС поля и следовательно может быть использована в качестве меры перспективности i -го наблюдения по соответствующим исходным переменным. Ореолы повышенных значений Δg_j ($j = 1, 2, 3$)* отвечают участкам горных пород с проявлением наложенных процессов, приводящих к нарушению первично-конституционального распределения радиоактивных элементов. То есть, они имеют ту же смысловую нагрузку, что и области повышенных концентраций, являющиеся основными прогнозными элементами аэroradiogeохимических карт.

Как видно из выражения 3.13, для вычисления любого Δg_i необходимо и достаточно знать величину обусловленной фоновым фактором f_{ii} составляющей концентрации j -го элемента.

Отсюда, на основе ортогонального разложения наблюденного АГС поля на факторные составляющие, предлагается следующий алгоритм автоматизированного построения аэroradiogeохимических карт.

I. Вычисление элементов вектор-столбца \bar{g} (размерности m) оценок средних:

$$\bar{g} = Q \varepsilon / \varepsilon \varepsilon' \quad (3.14)$$

и диагональной матрицы S (размерностью $m \times m$) оценок стандартов m переменных:

$$S_{jj} = \left[\sum_{i=1}^m (g_{ii} - \bar{g}_j)^2 / (n-1) \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (3.15)$$

где Q - матрица ($m \times n$) измеренных значений поля, прошедших стандартный граф обработки (ввод и запись на внешний накопитель

* Здесь и далее первая вектор-строка матрицы Q соответствует концентрациям урана, вторая - тория, третья - калия.

ЭВМ, контроль, переход к реальным физическим единицам, устранение сбоев, сглаживание флюктуационных помех, введение поправок, интерполяция в узлы регулярной сети); n – число наблюдений (объектов) в пределах предполагаемой площади радиогеохимических построений; \vec{E}' – вектор-строка размерности n и вида $\{I, I, \dots, I\}$.

Обычно при радиогеохимических построениях в качестве дополнительных параметров широко используются всевозможные индикаторные отношения (торий-урановое, уран-калиевое и др. [4, 18]). Поэтому вопрос о выборе исходных признаков заслуживает особого внимания.

В принятой выше формулировке задача радиогеохимического картирования рассматривается как частный случай проблемы распознавания образцов с разделением объектов исследования на два класса: неизмененные (слабоизмененные) горные породы и горные породы с нарушенным первично-конституциональным распределением элементов. В этом случае, как показано в работе [12], функции от измеренных переменных не несут никакой дополнительной информации относительно объектов различаемых классов по сравнению с самими переменными. Следовательно, использование в качестве отдельных признаков всевозможных трансформаций радиогеохимического поля (отношения концентраций, относительные интенсивности урана, тория, калия в интегральном гамма-излучении и т.д.) для выделения перспективных площадей по описываемой методике нецелесообразно. К аналогичному заключению пришли и американские специалисты, использующие факторный и компонентный анализ для интерпретации АГС данных [28, 29, 31].

2. Нормирование исходных значений переменных:

$$\hat{Q} = S^{-1}(Q - \bar{q}\vec{E}'), \quad (3.16)$$

где \hat{Q} – матрица ($m \times n$) нормированных значений наблюденных переменных.

3. Вычисление элементов выборочной корреляционной матрицы R :

$$R = (n-1)^{-1} \hat{Q} \hat{Q}' \quad (3.17)$$

Следует подчеркнуть, что интерпретация компонент, полученных по ковариационной матрице, неоднозначна вследствие трудноучитываемых различий дисперсий и ковариаций признаков. Использование корреляционной матрицы в качестве объекта компонентного анализа позволяет получить результаты, инвариантные к изменению масштабов измеренных значений переменных.

Для оперативного выделения под наземную оценку перспективных площадей целесообразно строить аэrorадиогеохимические карты и в

процессе текущей повылетной обработки АГС информации по результатам статистического анализа каждой вновь поступающей в ВЦ порции аэроданных. В этом случае, как правило, существенно снижается влияние систематических расхождений в результатах наблюдений по отдельным вылетам, но полученные карты аномальных концентраций будут сопоставимы между собой только при условии, что различия в распределениях значений аэрогеохимических признаков для этих вылетов незначимы (см. прил.2).

Для сравнения распределений по каждому вылету дополнительно рассчитывается матрица смешанных произведений P (порядка $m \times m$), элементами которой являются:

$$P_{jk} = \sum_{i=1}^{n_0} y_{ji} y_{ki}, \quad (3.18)$$

где n_0 - количество дискретных измерений по данному вылету;

$j = 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, \dots, m$.

В данном алгоритме решение прямой задачи факторного анализа направлено, в первую очередь, на извлечение фонового фактора, отражающего свойственную неизмененным породам структуру радиогеохимического поля. Поэтому, при выполнении операций I+3 из совокупности исходных данных Q автоматически исключаются наблюдения в пределах выделенных специальной программой [2, 4] локальных аномалий с существенно моноэлементной ($y_j \geq 0,75; j = 1, 2, 3$) природой радиоактивности, которые, как правило, связаны с проявлениями наложенных процессов и обладают структурой связей между АГС параметрами, максимально отличной от породной [19].

Из анализируемой выборки исключаются также все измерения с аномально низкими значениями радиоактивности, в которых концентрации урана, тория и калия не могут быть определены АГС методом достоверно. Исходя из погрешностей съемки и достоверного уровня определения содержаний, в качестве минимальных приняты следующие величины: по каналу общего счета - $0,15 \text{ фA}/\text{кг}$; по каналам содержаний: $0,25 \cdot 10^{-4}\%$ для урана, $0,5 \cdot 10^{-4}\%$ для тория и $0,25\%$ для калия.

В целях уменьшения автокорреляционных влияний расстояние между наблюдениями, используемыми для вычисления элементов матрицы R , должно быть не менее 500 м (диаметр излучающего диска, с которого на рабочей высоте 60-70 м фиксируется около 95% гамма-излучения в области энергий 64-480 фэ). Это расстояние превышает обычно наблюдаемый радиус автокорреляции сигнала, обусловленного геологическими факторами [13].

Если в качестве исходных данных используются результаты АГС

съемки, интерполирование в узлы прямоугольной сети, при выборе минимального расстояния между точками наблюдения для расчета элементов корреляционной матрицы следует исходить из размеров ячейки осреднения, принятой при интерполяции.

4. Определение собственных значений и собственных векторов корреляционной матрицы методом Хоттинга [5]. Используя диагональное преобразование матрицы R , получаем

$$\Lambda = U' R U, \quad (3.19)$$

где U - ортогональная матрица собственных векторов ($m \times m$); Λ - диагональная матрица ($m \times m$) с собственными значениями λ_j на главной диагонали, расположеннымими в порядке убывания $(\lambda_1 > \lambda_2 > \dots > \lambda_m)$.

Столбцы матрицы U нормируются так, чтобы $U' U = I$.

5. Формирование матрицы факторных нагрузок W путем преобразования:

$$W = U \Lambda^{1/2}. \quad (3.20)$$

6. Вычисление вектора-строки значений фонового фактора:

$$f'_1 = \lambda_1^{-1} w'_1 Q, \quad (3.21)$$

где w_1 - первый вектор-столбец матрицы W .

Анализируемая корреляционная матрица R отражает, главным образом, характер связей, свойственный фоновому состоянию радиогеохимического поля в пределах исследуемой площади. Поэтому, в качестве фонового фактора всегда интерпретируется тот собственный вектор матрицы R (в данном случае - первый: $w_1 = \lambda_1^{-1/2} w_1$), который совпадает с основным направлением изменчивости рассматриваемой геохимической системы.

Свойство первого фактора фиксировать особенности геологического строения территории отмечается и зарубежными специалистами [28-31], применяющими МГК для обработки АГС данных в помощь геологическому картированию.

7. Расчет элементов матрицы аномальных (наложенных) составляющих значений исходных признаков:

$$\Delta \hat{Q} = \hat{Q} - w_1 f'_1. \quad (3.22)$$

8. Построчное нормирование матрицы $\Delta \hat{Q}$:

$$Z'_j = \Delta \hat{Q}'_j / (1 - w_{j1}^2)^{-1/2}, \quad (3.23)$$

где Z_j^i - вектор-строка нормированных по своему стандарту $(1 - \omega_{ji}^2)^{1/2}$ значений аномальной составляющей концентрации j -го элемента; $j = 1, 2, \dots, m$.

9. Графическое изображение с помощью выводных устройств ЭВМ прогнозно-геохимической нагрузки аэорадиогеохимической карты. При этом особыми символами (знаками) отмечаются ореолы аномально высоких (низких) значений наложенных составляющих каждого из радиоактивных элементов.

К аномальным относятся наблюдения, для которых справедливо требование

$$Z_{ji} = \max_i \{ |Z_{ei}| \} / (|Z_{ei}| > \zeta_i) \wedge (j = e) \wedge (|Z_{ei}| > Z_{min}), \quad (3.24)$$

где Z_{ji} - величина аномальной составляющей j -го элемента в i -м измерении; Z_{min} - минимальная величина поля, для которой аномальная составляющая может быть вычислена достоверно; ζ_i - порог, определяющий границы нормального геохимического фона;

$$i = 1, 2, \dots, n; \quad e = 1, 2, \dots, m.$$

Функция распределения значений вектора Z_j^i , вычисленных по тем же исходным данным, что и элементы матриц R , S и вектора \vec{g} , имеет математическое ожидание $M(Z_j^i) = 0$, дисперсию $D(Z_j^i) = 1$ и, как правило, хорошо согласуется с нормальной моделью (в соответствии с центральной предельной теоремой Ляпунова, так как для неизмененных горных пород каждый Z_{ji} представляет собой сумму большого числа соизмеримых по величине слагаемых). Следовательно, по таблицам функции Лапласа [7] можно определить, какая доля совокупности всех возможных значений Z_j^i заключена в контуре, ограниченном изолинией любого K -го сечения. То есть, принимаемые градации изолиний являются, по существу, вероятностными характеристиками принадлежности к фоновой совокупности соответствующих им по данному признаку точек наблюдения и позволяют с заданной надежностью локализовать области с содержаниями и взаимосвязями радиоактивных элементов, маловероятными для неизмененных пород.

Учитывая это и исходя из принятого определения нормального геохимического фона, для картирования ореолов повышенных (пониженных) значений наложенных составляющих величина порога ζ в формуле 3.24 взята равной 1,3. Аномальные (по модулю) элементы матрицы выявляются при $\zeta = 3$.

Наблюдения, не удовлетворяющие условиям формулы 3.24, дифферен-

цируются по величинам измеренных значений наиболее информативного признака (главного элемента геохимической нагрузки), выбираемого с учетом радиогеохимических характеристик ожидаемых типов месторождений полезных ископаемых.

При печати геохимической нагрузки аэrorадиогеохимической карты на АЦПУ ЭВМ целесообразно ореолы с положительными и отрицательными значениями χ_j представлять в символах, имитирующих вертикальную и горизонтальную штриховку. Особыми знаками отмечаются перспективные на тот или иной вид минерального сырья локальные аномалии (см. раздел 3.3).

Выделенные ореолы аномальных концентраций группируются вручную в зоны нарушенного распределения радиоактивных элементов. При этом необходимо учитывать, что статистическая природа радиогеохимического поля, обусловленная естественной дисперсией радиоактивных элементов в исследуемых средах и аппаратурно-методическими погрешностями, а также наличие радиогеохимически специализированных комплексов, свит, толщ и т.д. не исключают появления аномальных значений вектора χ_j и в пределах неизмененных горных пород. Поэтому, в первую очередь, в зоны с отличным от нормального геохимического фона распределением элементов объединяют участки, в пределах которых ореолы повышенных (пониженных) концентраций урана, тория или калия располагаются в связи с благоприятной геологической обстановкой (гидротермально-метасоматическими изменениями, тектоническими нарушениями, рудоконтролирующими фациями, комплексами и т.п.).

Слабо проявленные ореолы, которые фиксируются менее, чем пятью пространственно сопряженными точками наблюдения с величиной $1,3 < |\chi_j| < 3$, могут быть переведены в разряд достоверно установленных лишь после наземной оценки при получении положительных результатов.

Раскраска карты выполняется в обычной цветовой легенде: ореолы с пониженными и аномально низкими концентрациями элемента главной геохимической нагрузки представляются в синих тонах, с повышенными и аномально высокими концентрациями - в красных, остальная площадь дифференцируется в единицах регионального геохимического фона и раскрашивается желтым и зеленым цветом.

В заключении оформлении (отдельно для неизмененных горных пород и локальных АГС аномалий) приводятся в виде сводных таблиц корреляционная матрица АГС параметров и результаты компонентного анализа.

3.3. Представление локальных АГС аномалий на аэroradiogeохимических картах

При автоматизированной обработке АГС информации в процессе осреднения и интерполяции в узлы регулярной (прямоугольной) сети измеренных значений геохимического поля наибольшие искажения претерпевают гамма-спектрометрические характеристики локальных объектов. Поэтому, в качестве обязательной дополнительной нагрузки, особыми знаками на итоговую аэroradiogeохимическую карту выносятся также все выделенные до отмеченных выше трансформаций АГС поля локальные аномалии^{*}.

Общее количество аномальных записей с приращением гамма- поля от 1 мкР/ч и более в отдельных районах составляет до 200–300 на 1000 км² [1]. Очевидно, что наземное изучение всех выделенных гамма-аномалий трудоемко и экономически нецелесообразно. Поэтому, уже в процессе составления аэroradiogeохимической карты необходимо в соответствии с ее специализацией оптимальным образом (в смысле обеспечения минимума ошибок первого и второго рода)^{**}, разделить аномалии на потенциально рудные и неперспективные для проведения наземных поисковых работ на предполагаемый вид минерального сырья.

Как показывает опыт АГС исследований, подавляющее большинство локальных аномалий (до 85–90% [8]) обусловлено причинами, непосредственно не связанными с рудообразующими процессами (варiationsлитологического состава неизмененных горных пород, колебаний мощности рыхлых образований, изменение условий измерения и т.д.) и обладает, как правило, смешанной природой радиоактивности ("породные" аномалии). Обшим свойством всех "породных" аномальных записей, как и при наблюдении фонового радиогеохимического поля является наличие значимой положительной корреляционной связи между их основными гамма-спектрометрическими характеристиками. Следователь-

* Локальная АГС аномалия – зарегистрированное аэrogramма-спектрометром отклонение гамма- поля от нормального значения, имеющее ширину на половине приращения над окружающим фондом менее 350 м [25].

** Под вероятностью ошибки первого рода (α) здесь подразумевается вероятность отнесения аномалий, обусловленной рудным объектом, к неперспективным. Вероятность ошибки второго рода (β) характеризует относительную частоту, с которой "породная" аномалия принимается за "рудную".

но, можно использовать методику, описанную в разделе 3.2, и для выделения из общей совокупности перспективных на некоторые типы оруденения локальных аномалий с существенно иными (по сравнению с неизмененными породами) соотношениями и взаимосвязями элементов.

Каждая локальная аномалия при этом характеризуется шестью основными признаками – максимальными ($\hat{g}_1^{(M)}, \hat{g}_2^{(M)}, \hat{g}_3^{(M)}$) и фоновыми ($\hat{g}_1^{(P)}, \hat{g}_2^{(P)}, \hat{g}_3^{(P)}$) концентрациями элементов, – с которыми функционально связаны прочие рекомендуемые технической инструкцией [25] параметры. Для указанных признаков по всему множеству выделенных на площасти радиогеохимических построений локальных аномалий рассчитываются корреляционная матрица (R), диагональная матрица стандартных отклонений (S) и вектор средний (\bar{g}).

Дальнейший ход вычисления значений вектора $\Delta\hat{g}_j$ (напоженной составляющей в аномальной концентрации j -го элемента) аналогичен изложенному в разделе 3.2. Найденная по формуле 3.22 величина $\Delta\hat{g}_{ik}$ характеризует доминантность аномального приращения содержания j -го элемента по отношению к аномальным приращениям значений двух других гамма-спектрометрических признаков и позволяет на основании общих сведений о поведении радиоактивных элементов в конкретных рудообразующих процессах сделать заключение о перспективности каждой i -ой аномалии на соответствующий тип оруденения.

В частности, при поисках месторождений радиоактивных элементов в "рудную" совокупность объединяют аномалии с величиной нормированной напоженной составляющей максимальной концентрации урана $Z_{ii}^{(M)} = \Delta\hat{g}_{ik}^{(M)} (1 - w_{ii})^{-1/2}$ выше 1,3, причем наибольший интерес представляют локальные объекты с $Z_{ii}^{(M)} > 3$.

Поисковыми признаками на эпитеrmальное золотое оруденение являются локальные повышения содержаний калия, иногда урана, не сопровождающиеся ростом концентрации тория [2]. В этом случае для выделения перспективных аномалий следует использовать величины $Z_3^{(M)}$ и $Z_1^{(M)}$.

При поисках бокситов аномалии преимущественно ториевой природы определяют с помощью $Z_2^{(M)}$ и т.д.

Местоположение локальных аномальных записей, оцененных в результате проведенной классификации как перспективные, указывается на аэрогеохимической карте специальными значками (символами АЦПУ) с учетом их природы и степени отличия от фоновой совокупности.

В качестве примера на рис. II приводятся результаты классификации II8 локальных АГС аномалий, практическая значимость которых

на стратиформное урановое оруденение установлена детальными наземными работами.

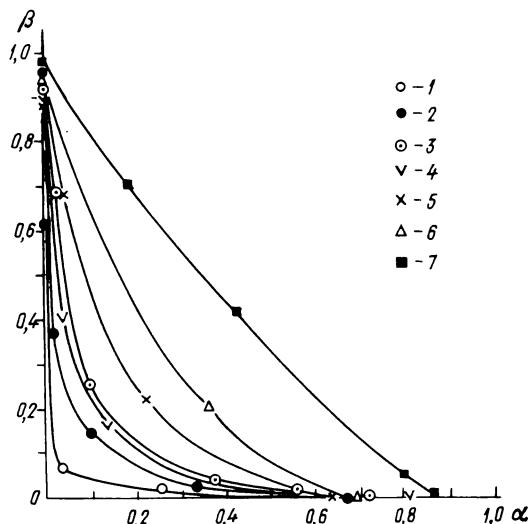


Рис. II. Соотношение между ошибками первого (α) и второго (β) рода при распознавании рудных и породных локальных АГС аномалий.

1 - $Z_U^{(m)}$; 2 - g_u/g_k ;
3 - $U_{\gamma}^{(m)}$; 4 - $g_u^{(m)}$; 5 -
 $g_m^{(m)}/g_u^{(m)}$; 6 - $\Delta g_u =$
 $= g_u^{(m)} - g_u^{(p)}$; 7 - $\Gamma^{(m)}$.

В данном регионе рекомендуемые технической инструкцией параметры (индикаторные отношения $g_1, 1g_1, g_1/g_3, \Delta g_2/1g_1, \Delta g_2/g_3$ и др., величина относительной интенсивности урана в интегральном гамма-излучении $\gamma_{\text{т}}$) существенно различаются в разных типах неизмененных горных пород и элементарных ландшафтов (рис. I.0) и, поэтому, без привлечения дополнительной информации не всегда оптимально решают вопрос о разделении множества выделенных локальных аномалий на "рудную" и "породную" совокупности (рис. II).

Для сравнения параллельно выполнена классификация тех же локальных объектов на основе компонентного анализа по описанному выше алгоритму. Исходными данными для расчета K , \bar{g} и S послужили гамма-спектрометрические характеристики выделенных по каналу общего счета в процессе обработки данных АГС съемки I:25 000 масштаба 997 аномальных записей. Полученные в итоге высокие значения коэффициентов линейной корреляции Пирсона между аэрохимическими признаками, структура и вес первого ("породного") фактора (табл. I.0) подтверждают правомерность принятого выше допущения о преобладании в общей совокупности всех зафиксированных в ходе

Таблица 10
 Коэффициенты линейной корреляции и факторные нагрузки на главные компоненты, рассчитанные по АГС характеристикам 997 локальных аномальных записей

Коэффициенты линейной корреляции Пирсона (Р)						Факторные нагрузки на главные компоненты							
	$\varphi_1^{(M)}$	$\varphi_2^{(M)}$	$\varphi_3^{(M)}$	$\varphi_1^{(P)}$	$\varphi_2^{(P)}$	$\varphi_3^{(P)}$	Признак	1	2	3	4	5	6
I	0,44	0,37	0,78	0,60	0,51	$\varphi_1^{(M)}$	0,756	-0,554	0,173	-0,021	0,298	0,013	
I	0,55	0,53	0,79	0,53	$\varphi_2^{(M)}$	0,808	0,179	-0,497	0,162	0,053	0,191		
I	0,41	0,46	0,69	$\varphi_3^{(M)}$	0,695	0,585	0,281	0,263	0,102	-0,120			
I	0,62	0,54	$\varphi_1^{(P)}$	0,813	-0,412	0,161	0,248	-0,283	0,004				
I	0,67	$\varphi_2^{(P)}$	0,877	-0,022	-0,022	-0,343	-0,229	-0,237					
I	$\varphi_3^{(P)}$	0,822	0,269	0,297	-0,363	-0,082	0,150						
Вес фактора,		63,6	15,4	9,8	5,7	3,2	2,1						

Минимальная величина R , значимо отличного от нуля при 1% уровне значимости: 0,05%

съемки аномальных записей гамма- поля объектов "породной" природы. Соотношение ошибок первого и второго рода, допущенных при распознавании объектов экзаменационной выборки традиционными способами (по индикаторным отношениям и надфоновым приращением концентраций элементов) и с помощью метода главных компонент (по величине $\chi_{ij}^{(m)}$), свидетельствует о высокой эффективности предлагаемого подхода к классификации АГС аномалий в процессе автоматизированного построения аэroradiogeохимических карт.

Глава 4. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ АЭРОРАДИОГЕОХИМИЧЕСКИХ ПОСТРОЕНИЙ

4.1. Общие положения

Результаты аэroradiogeохимических построений анализируются в соответствии с целевым назначением геологических работ. Анализ проводят в два этапа - полевой и камеральный. Основная цель полевого этапа - оперативное выделение для наземной проверки полей аномальных и повышенных концентраций и зон с нарушенным первично-конституциональным распределением радиоактивных элементов.

При использовании аппаратурь ИКА-2 интерпретацию вначале проводит бортоператор в процессе полета. По сигналу классифицирующего устройства в полете он производит детализацию перспективной информации. После полета результаты аэросъемки анализируют старший специалист аэропартии (летного отряда) совместно с бортоператором. Анализ выполняют по первичным материалам - лентам записи концентраций радиоактивных элементов и классифицирующего устройства ИКА-2 с учетом данных гамма- поля и магнитного каналов.

В процессе послеполетного рассмотрения материалов для дополнительного аэрогеофизического и наземного изучения выделяют малоинтенсивные локальные аномалии, располагающиеся вблизи или в пределах полей аномальных и повышенных концентраций элементов.

Выделенные под наземную проверку аэroradiogeохимические поля и локальные аномалии нумеруют, заносят в регистрационный журнал и передают в группу обработки для передачи материалов в отряды наземной проверки.

В полевой период, обычно через месяц после начала аэросъемки, проводят предварительную статистическую обработку АГС данных и подготавливают макетные варианты аэroradiogeохимических карт. По картам выявляют основные радиогеохимические закономерности в распределении радиоактивных элементов в горных породах, устанавлива-

ют корреляционные связи между элементами для основных выделенных таксонов. Поля аномальных и повышенных концентраций классифицируют по природе радиоактивности, величине приращения над фоном, связи с геологическими и ландшафтными образованиями. Для наземной проверки выделяют в первую очередь площади, включающие поля повышенных концентраций элементов с нарушенным характером взаимосвязи, ассоциирующие с благоприятными геологическими обстановками (специализированными комплексами, свитами, толщами, горизонтами, фациями, гидротермально-метасоматическими изменениями, тектоническими элементами и т.д.).

В камеральный период производят окончательную редакцию аэро радиогеохимических карт с использованием результатов их наземного изучения. Основная цель анализа на этом этапе состоит в извлечении наиболее полной информации из аэорадиогеохимических карт относительно поисков и прогнозирования месторождений различных типов полезных ископаемых. Для этого уточняют параметры геохимического фона радиоактивных элементов в выделенных осадочных, метаморфических и магматических формациях (комплексах, свитах, толщах, отдельных интрузивных и субвулканических телах и т.д.). Выявляют тенденции в поведении радиоактивных элементов в связи с историей геологического развития района. Определяют специализированные на уран, торий и др. элементы геологические таксоны, оценивают связь полей аномальных концентраций с различными эпигенетическими процессами (ультраметаморфизм, региональный и дислокационный метаморфизм, региональные и локальные гидротермально-метасоматические изменения различных типов, процессы корообразования и др.). Определяют вероятностно-статистические закономерности связи оруденения различных типов с аэорадиогеохимическими полями и локальными аномалиями (устанавливают прямые и косвенные АГС признаки типового оруденения района).

На основе полученной информации производят районирование изученной площади по степени ее радиогеохимической дифференциированности. В результате районирования выявляют разнотипные провинции, области и радиогеохимические зоны с нарушенным характером взаимосвязей элементов и на этой основе выделяют площади для постановки крупномасштабных поисковых воздушных или наземных работ.

4.2. Некоторые особенности анализа аэroradiogeохимических построений при поисках месторождений радиоактивных элементов

В общих чертах методика анализа итоговой информации при построении радиохимических карт по наземным и, в меньшей степени, АГС данным изложена в работах [10, 16, 21].

Ниже рассмотрены некоторые особенности анализа аэroradiogeохимических карт в связи со специфическими условиями проявления уранового оруденения.

На аэroradiogeохимических картах щитов древних платформ, срединных массивов и зон их тектоно-магматической активации в связи с проявлением преимущественно эндогенных типов оруденения практический интерес приобретают поля повышенных концентраций урана, сопряженные с полями повышенных концентраций тория и калия с нарушением взаимосвязи элементов. Как правило, эти поля связаны с зонами многократной тектоно-магматической и метаморфической активизации, с проявлениями метасоматических и гидротермальных рудообразующих процессов.

Особенно важно в этих районах выделять поля повышенных концентраций урана в связи с породами амфиболитовой, эпидот-амфиболитовой и зеленосланцевой фаций метаморфизма, участками распространения полингенных и анатектоидных гранитов, мигматитов, пегматоидных образований и диафторитов различного состава.

В качестве первоочередных для наземной проверки выделяют зоны, в пределах которых повышенные концентрации урана группируются внутри или вблизи площадей проявления калиево-кремниевого, натрового и карбонатного метасоматоза, на участках внешних зон гранитогнейсовых куполов, в связи со специализированными на уран гнейсовыми или конгломератовыми свитами (толщами, горизонтами). Следует обращать также внимание на зоны трещиноватости и катахлаза с развитием эпидот-хлоритовых милонитов, катахлазитов и биотит-амфиболовых бластомилонитов. Иногда повышенные концентрации урана могут быть связаны с магматическими породами калиевых щелочных и щелочно-земельных, щелочно-ультраосновных интрузивных комплексов и их эффузивных аналогов.

Для аэroradiogeохимических зон этих районов характерно развитие линейных, слабо вытянутых, иногда ассиметрично расположенных полей повышенных концентраций элементов урано-ториевой, урано-ториево-калиевой и урано-калиевой природы радиоактивности, обус-

ловленных перераспределением элементов в процессе метаморфизма и гидротермального метасоматоза. Особенно четко зональность прослеживается по периферии гранито-гнейсовых куполов.

Конфигурация контуров радиогеохимических зон с нарушенным распределением урана в некоторых случаях подчеркивается линейными зонами повышенных содержаний тория. Такие зоны могут достигать протяженности в несколько десятков километров.

На рис. I2 приведен пример линейных ореолов аномальных концентраций тория, вблизи которых локализуются ореолы повышенных концентраций урана, контролирующие размещение проявлений радиоактивной минерализации.

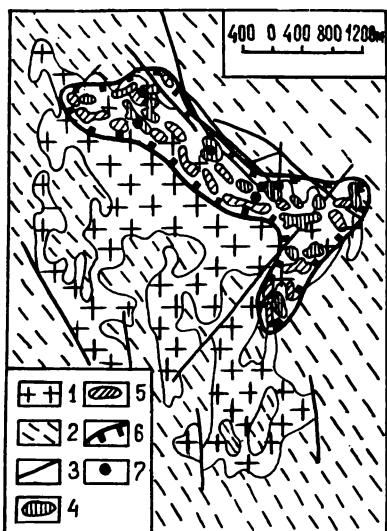


Рис. I2. Линейная аэrorадиогеохимическая зона, контролирующая редкоземельно-сульфидное оруденение в краевой части гранито-гнейсового купола.
I - гнейсо-граниты; 2 - кристаллические сланцы; 3 - разломы; аномальные аэrorадиогеохимические поля: 4 - урана; 5 - тория; 6 - граница аэrorадиогеохимической зоны; 7 - рудные проявления

Для рудных районов с широко проявленными процессами тектономагматической активизации на щитах в ряде случаев характерно широкое развитие полей повышенных содержаний урана (радия) и калия. Радиогеохимические зоны с повышенными полями урано-калиевой природы радиоактивности иногда ассоциируют с кварц-адуляровыми и эгирин-калишпатовыми метасоматитами вблизи тектонических структур древнего заложения.

Многие аэrorадиогеохимические зоны, контролирующие эндогенное урановое оруденение в пределах древних щитов, отмечаются повышенной плотностью локальных АГС аномалий. Число таких аномалий с то-

рий-урановым отношением 0-2 в пределах аэroradiogeохимических зон нередко составляет 50-70 на 100 кв.км по сравнению с 10-20 аномалиями за пределами зон на той же территории. Большое число локальных аномалий является следствием перераспределения радиоактивных элементов в процессе метасоматических процессов.

Щелочные и субщелочные интрузивные породы поздних фаз тектономагматической активизации, как правило, обуславливают изометрические в плане формы ореолов повышенной радиоактивности урано-ториево-калиевой природы. Содержания тория по АГС данным при этом составляют от $30-40 \cdot 10^{-4}\%$ до $50-70 \cdot 10^{-4}\%$, калия от 4-5% до 6%. Поля повышенных концентраций урана часто приурочены к краевым частям периферийных зон ториево-калиевой природы и удалются от них не более чем на 0,5-1 км.

В ряде случаев рудоносные интрузивные тела щелочного состава отмечаются своеобразной концентрической зональностью полей содержаний радиоактивных элементов с преимущественным обогащением ураном и торием краевых, калием и торием - центральных зон.

В одном из изученных районов была эмпирически установлена связь между величинами абсолютных содержаний тория в рудоконтролирующих субвуликанических телах и эфузивах щелочного ряда и масштабом уранового оруденения. Содержания тория в аномально-радиоактивных щелочных комплексах, ассоциирующих с месторождениями урана золотонастурганового типа, составляли $40-70 \cdot 10^{-4}\%$, рудопроявлениями - $25-30 \cdot 10^{-4}\%$ и проявлениями урановой минерализации - $15-20 \cdot 10^{-4}\%$.

На аэroradiogeохимических картах складчатых областей повышенного внимания заслуживают зоны, вмещающие поля концентраций урана, ассоциирующие со следующими геологическими образованиями:

а) специализированными на уран породами лейкогранитовой, щелочно-гранитовой, липарито-гранитовой, базальт-липарито-гранитовой магматических формаций, стратiformными осадочно-вулканогенными, фосфорито-, угленосно- и углеродисто-кремнисто-сланцевыми формациями;

б) вулкано-тектоническими постройками центрального типа в пределах внутренних эпирогенных вулканических поясов, особенно в связи с их приповерхностными и жерловыми фациями;

в) гидротермально-метасоматическими изменениями пород, оказывавшими существенное влияние на распределение радиоактивных элементов. Предпочтение отдают пропилито-березитовой и калишпатофирио-аргиллитовой региональным метасоматическим формациям, играющим существенную роль в локализации уранового оруденения. Особенно

важными представляются участки возможных геохимических барьеров [20, 21];

г) разрывными нарушениями и окаймляющими их зонами повышенной трещиноватости и проницаемости.

Интенсивность проявления аэродиагеохимических признаков в пределах складчатых областей находится в большой зависимости от степени радиоактивности пород фундамента и интенсивности переработки его процессами тектономагматической активизации в поздние этапы развития.

В ряде складчатых областей устанавливается радиогеохимическая унаследованность магматических образований поздних этапов развития от характера и природы радиоактивности пород фундамента и зависимость проявления полей повышенных концентраций элементов от особенностей активизированных зон. Конфигурация радиогеохимических зон, как правило, подчиняется плану рудовмещающих активизированных структур, включающих проявления многофазной интрузивной и вулканической деятельности.

В складчатых областях в пределах отдельных радиогеохимических зон нередко поля повышенных концентраций урана, контролирующие урановую минерализацию, группируются в краевых частях гранитоидных массивов, в целом отличающихся весьма неравномерным распределением в них радиоактивных элементов. При этом поля повышенных концентраций урана занимают от 20–30% до 50–70% площади гранитного массива. По размерам они изменяются от первых сотен метров до 2–5 кв.км, группируясь в зоны протяженностью до 10–20 км (рис. I.3).

Важными аэродиагеохимическими признаками перспективных зон, пространственно связанных с палеовулканическими структурами, являются поля повышенных и аномально высоких концентраций тория. Повышенные поля урана при этом обычно сопряжены с повышенными концентрациями тория, но иногда тяготят к их краевым и периферическим частям (рис. I.4). Размер аномально радиоактивных полей тория определяется интенсивностью проявления гидротермально-метасоматических преобразований пород и составляет от первых сотен до первых десятков километров.

Эпигенетическое урановое оруденение в позднеорогенных впадинах складчатых областей может быть выявлено на основе косвенных аэродиагеохимических признаков, проявляющихся в прибрежных частях или в ближайшем складчатом обрамлении. Большинство впадин, вмещающих урановое оруденение, сопровождается развитием высокорадиоактивных гранитоидов и метаморфических пород в ближайшем их обрам-

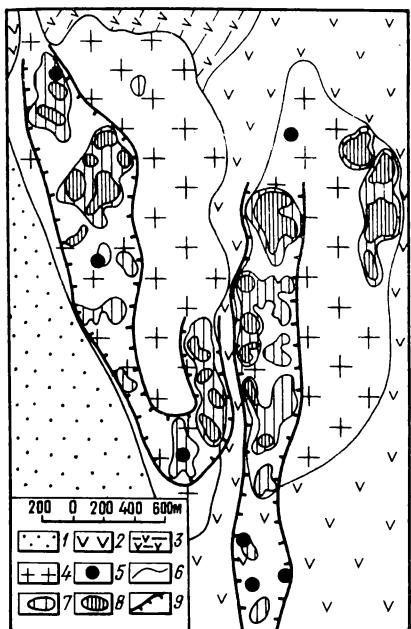


Рис. I.13. Выделение аэрорадиогеохимических зон в краевых частях гранитных интрузий.

1 - песчаники; 2 - туфиты; 3 - порфириоды; 4 - граниты; 5 - рудные проявления; 6 - геологические границы; аномальные аэрогеохимические поля урана: 7 - повышенные; 8 - аномально-высокие; 9 - границы аэрорадиогеохимических зон

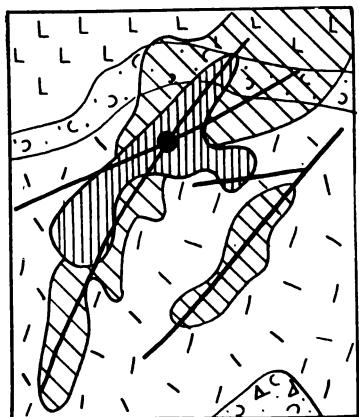


Рис. I.14. Сопряженность аномальных аэрорадиогеохимических полей урана и тория на участке гидротермального оруднения урана в кислых вулканиках.

1 - диабазовые порфириты; 2 - туфопесчаники кислого состава; 3 - игнимбриты липаритовые; 4 - лавобрекции липаритов; 5 - разломы; аномальные поля: 6 - урана; 7 - тория; 8 - рудопроявление урана



лении. Содержание урана в породах кристаллического обрамления впадин составляет $8-12 \cdot 10^{-4}\%$, тория - $25-30 \cdot 10^{-4}\%$, калия - 3-4%. Размеры полей повышенных концентраций радиоактивных элементов меняются от первых сотен метров до первых квадратных км. На аэорадиогеохимических картах впадин рудовмещающие горизонты выделяются группами слабых локальных аномалий и полей обычно чисто урановой (радиевой) природы радиоактивности. Характерен строгий их литолого-фациальный контроль (рис.15).



Рис.15. Пример локализации аномальными аэорадиогеохимическими зонами эпигенетического уранового оруднения в позднеорогенной впадине.
Отложения нижнего палеозоя: I - песчаники; 2 - известняки; 3 - гравелиты; 4 - алевролиты; 5 - конгломераты; 6 - гнейсы; 7 - разломы; 8 - проявления урана; аномальные аэорадиогеохимические поля урана: 9 - повышенные; 10 - аномально-высокие; II - границы аэорадиогеохимических зон

На аэорадиогеохимических картах чехлов древних и молодых платформ и зон их тектономагматической активизации с проявлением экзогенных месторождений урана, наиболее существенное значение приобретают радиогеохимические зоны, включающие слабоинтенсивные поля повышенных концентраций урана, часто не сопровождающиеся повышением концентраций других радиоактивных элементов.

Серьезного внимания заслуживают любые, даже самые незначительные повышения урана (радия), малоинтенсивные локальные аномалии или поля, группирующиеся в пределах горизонтов фосфатных сланцев,

алевролитов, песчано-глинистых пород с повышенным содержанием биогенной серы, органики, битумов и сульфидов. Практически интересными могут оказаться глинистые породы с остатками костных рыб, толщи переслаивания косослоистых линзовидных песчаников и аргиллитов в долинах палеорусел, песчано-сланцевые толщи с прослойями высокорадиоактивных пепловых вулканических туфов с повышенной ураноносностью, угленосные породы, особенно в связи с углями повышенной зольности.

При анализе аэродиагеохимических карт в районах проявления экзогенных типов оруденения следует уделять внимание особенностям распределения урана (радия) в пределах толщ с определившимися для регионов продуктивными стратиграфическими уровнями.

Аэродиагеохимическими признаками перспективности таких отложений могут служить зоны максимального распространения групп локальных аномалий, приуроченных к благоприятным для локализации уранового оруденения сероцветным (или зеленоцветным) фациям песчано-глинистых пород контрастной проницаемости, а также к площадям проявления процессов пластового окисления и оглеения пород.

Аэродиагеохимические признаки экзогенных месторождений в рыхлом чехле по АГС данным проявлены менее контрастно. Наиболее характерны для месторождений этого типа поля слабоповышенных концентраций урана при фоновых или пониженных концентрациях тория и калия. Размер полей содержаний урана колеблется от 0,1-0,2 кв.км до 1-7,5 кв.км.

В районах проявления эпигенетических типов оруденения в рыхлом чехле платформ по косвенным аэродиагеохимическим признакам могут быть выделены групповые аномалии урановой природы радиоактивности, связанные с гипергенными аккумуляциями урана. Иногда наблюдается пространственная взаимосвязь слабо повышенных полей урана (радия) с направлением древней или современной гидросети, зонами глубинных нарушений, поднятиями фундамента или купольными газоносными структурами, отмечаемыми аэрогеофизическими методами.

Карты содержаний урана, тория и калия, составленные по районам некоторых гидрогенных месторождений, залегающих в пологих структурах на глубинах 50-100 и более метров от поверхности, имеют сложный и геологически не всегда объясняемый рисунок. В этих районах обращает на себя внимание приуроченность слабых полей концентраций урана (радия) к участкам повышенной проницаемости горных пород в чехле и фундаменте. Эмпирические данные показывают предпочтительную локализацию уранового оруденения эпигенетического

типа в осадочных отложениях депрессионных структур, фундамент и кристаллическое обрамление которых аномально радиоактивным. Во впадинах, сформированных на слаборадиоактивных карбонатных и метаморфических породах, урановая минерализация эпигенетического типа встречается реже.

В одном из районов степной semiаридной зоны АГС съемкой был изучен участок с гидрогенным урановым оруденением. Урановые ореолы приурочены к третичным и четвертичным отложениям и залегают вблизи гранитного массива с неравномерной повышенной радиоактивностью (рис. I.6). Содержания урана в лейкократовых гранитоидах по

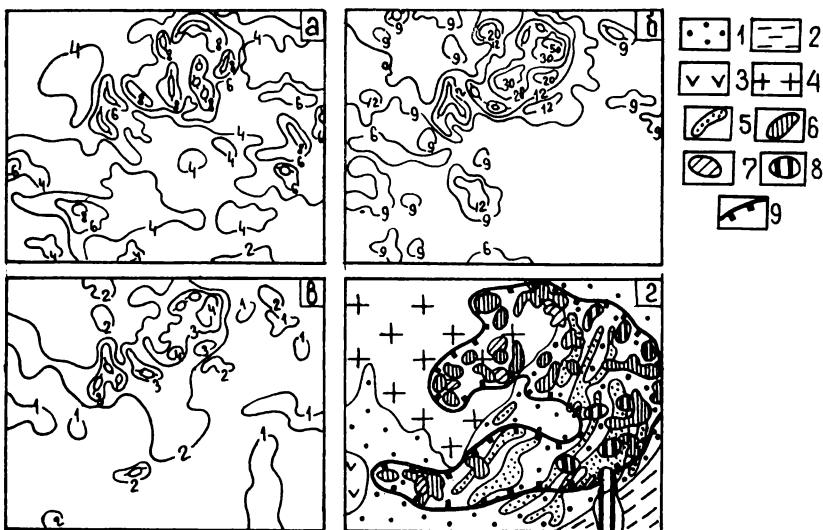


Рис. I.6. Результаты аэрорадиогеохимического картирования участка с гидрогенным урановым оруденением.

Карты измеренных концентраций: а - урана, $10^{-4}\%$; б - тория, $10^{-4}\%$; в - калия, %; г - аэрорадиогеохимическая карта: 1 - пески, глины; 2 - сланцы, песчаники; 3 - основные эффузивы; 4 - граниты; 5 - рудные ореолы по наземным данным; 6 - повышенные аэрорадиогеохимические поля; повышенные 6 - урана и 7 - тория; пониженные 8 - калия; 9 - контур аэрорадиогеохимической зоны

аэроданным составляют в среднем $8 \cdot 10^{-4}\%$, реже до $15 \cdot 10^{-4}\%$, содержания тория от $20-30 \cdot 10^{-4}\%$, до $40-50 \cdot 10^{-4}\%$. По данным аэрорадиогеохимических построений поля повышенных содержаний урана (радия) и, в меньшей степени, тория картируют участки развития аномально-

радиоактивных разновидностей гранитов. Рудные ореолы в осадочных отложениях с воздуха выделяются повышенными содержаниями урана (радия) интенсивностью от $6\text{--}8 \cdot 10^{-4}\%$ до $12 \cdot 10^{-4}\%$ и пониженными содержаниями калия.

Глава 5. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДИКИ АЭРОРАДИОГЕОХИМИЧЕСКОГО КАРТИРОВАНИЯ ПРИ ПРОГНОЗИРОВАНИИ И ПОИСКАХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Анализ эффективного применения аэорадиогеохимических построений для прогнозирования и поисков месторождений полезных ископаемых выполнен по материалам производственных аэросъемок, включая опытно-методические работы в различных геологических и ландшафтных условиях территории СССР. Большая часть съемок проведена с аппаратурой ГСА-70, ГСА-77 на вертолетах типа МИ-4, МИ-8 и самолетах АН-2.

Несмотря на относительно слабую разработанность критериев поисков и прогнозирования месторождений рудных полезных ископаемых накопленный опыт показывает, что аэорадиогеохимическое картирование, основанное на выделении статистически обоснованных полей повышенных концентраций радиоактивных элементов с характером корреляционных связей, отличных от породных, может быть с успехом использовано для оперативной прогнозной оценки больших территорий и выделения под крупномасштабные воздушные и наземные поиски локальных перспективных участков на многие виды полезных ископаемых.

Проведенные работы показали, что аэорадиогеохимические зоны с нарушенным распределением урана, тория и калия контролируют такие месторождения полезных ископаемых как молибден, вольфрам, ртуть, цезий, редкие земли, золото, медь, кобальт, свинец, цинк и др.

Анализ полученных материалов свидетельствует, что методика аэорадиогеохимического картирования может быть использована для повышения эффективности прогнозирования и поисков широкого круга месторождений полезных ископаемых. Возможности использования методики аэорадиогеохимического картирования для выявления рудных месторождений полезных ископаемых подтверждаются материалами, приведенными в работе [3]. Ниже приводится опыт применения аэорадиогеохимического картирования для выявления различных месторождений полезных ископаемых.

5.I. Месторождения редких и благородных металлов

По материалам производственных АГС съемок крупного масштаба (I:25 000 – I:50 000) приводятся примеры аэродиагеохимического картирования месторождений молибдена, вольфрама, ртути, цезия, редких земель и золота.

5.I.I. Молибден и вольфрам

Известно, что крупные промышленные концентрации молибденовых, молибдено-вольфрамовых, молибдено-медных и вольфрамовых руд штокверкового типа связаны с магматическими породами гранодиорит-гранитовой, гранит-лейкогранитовой и габбро-диорит-гранодиоритовой магматических формаций.

Наиболее детально АГС методом были изучены месторождения молибдена первых двух типов в трех районах аридной и горнотаежной ландшафтно-климатических зон.

Для молибдено-вольфрамовых месторождений характерна четкая пространственная взаимосвязь с лейкократовыми и аляскитовыми гранитами, характеризующимися повышенными концентрациями радиоактивных элементов. По данным АГС съемки концентрация урана в гранитах изученных месторождений варьирует в широких пределах, но постоянно повышена по сравнению с региональным кларком (табл. II).

Таблица II
Содержание радиоактивных элементов в гранитах,
контролирующих размещение молибдено-вольфрамового
оруденения (по АГС данным)

Регион, массив	Уран, $10^{-4}\%$	Торий, $10^{-4}\%$	Калий, %
Регион I			
массив А	6–8	35–40	3,5–4,0
массив Б	6–8	30–35	3,0–3,5
массив С	8–10	25–30	3,5–4,0
Регион II			
массив А	5–6	15–25	3,5–4,0
массив Б	5–7	15–20	3,0–4,0
массив С	5–6	12–18	3,5–4,5

Граниты в пределах рудных полей месторождений претерпевают интенсивную грейзенизацию с образованием различных по составу грейзенов и метасоматитов.

Основными аэroradiogeохимическими особенностями рудных полей месторождений являются повышения концентраций калия и урана при относительной инертности тория. Калий образует широкие (от первых десятков до многих сотен метров) радиогеохимические поля, которые объясняются калишпатофирами и кварц-светлослюдистыми метасоматитами. Как правило, зоны аномальных и повышенных концентраций калия со значениями $\bar{y}_K +I,3 S$ не ограничиваются контурами гранитных массивов, выходя в экзоконтактовую зону. Конфигурация полей повышенных концентраций калия определяется формами и глубиной залегания интрузивных тел, в пространственной связи с которыми развивается штокверковое оруденение. В плане радиогеохимические поля концентраций радиоактивных элементов имеют линейно-вытянутую, полукольцевую, кольцевую, серповидную и изометричную конфигурацию (рис. I.7).

В некоторых случаях отмечалось концентрически-зональное распределение полей повышенных концентраций калия с обогащением этим элементом центральных, наименее грейзенизованных, частей массивов и понижением концентрации калия в участках максимальной грейзенизации.

Для зон рудоносных грейзенов характерно заметное повышение концентраций урана, который не образует широких полей и выделяется в виде локальных ореолов размером в первые десятки и сотни метров. Содержания урана с воздуха достигают $8 \cdot 10 \cdot 10^{-4} \%$ до $12 \cdot 10 \cdot 10^{-4} \%$. При этом локальные аномалии урана, как правило, имеют низкое торий-урановое отношение (1,2-2,0). Эмпирически установлено уменьшение интенсивности урановых аномалий в экзогрейзеновых участках. Здесь приращения концентраций урана редко превосходят $3 \cdot 4 \cdot 10 \cdot 10^{-4} \%$ и в эндогрейзенах иногда достигают $8 \cdot 10 \cdot 10^{-4} \%$.

Для экзогрейзеновых месторождений молибдена характерны более протяженные аэroradiogeохимические поля концентраций калия и урана при фоновых содержаниях тория, группирующиеся в ряде случаев в линейные зоны. Для некоторых месторождений молибдена аэрометодом отмечена зональность в распределении полей концентраций урана и калия, проявляющаяся в последовательной смене по мере удаления от интрузий зон с повышенными концентрациями вначале урана, затем - урана и калия и, наконец, - калия (рис. I.8).

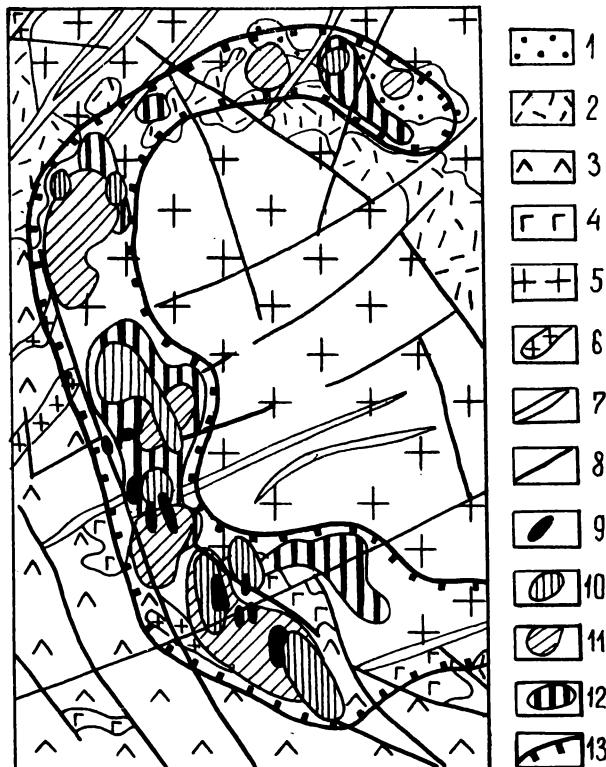


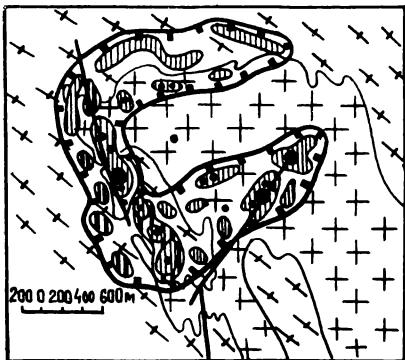
Рис.17. Аэорадиогеохимическое картирование молибден-вольфрамового оруденения грейзенового типа.

I - осадочные породы; 2 - фельзиты; 3 -андезито-дацитовые порфиры; 4 - габбро-диориты; 5 - граниты; 6 - гранит-порфиры; 7 - цайки кислого и основного составов; 8 - разрывные нарушения; 9 - рудные ореолы; аномальные аэорадиогеохимические поля: 10 -урана; 11 - тория; 12 - калия; 13 - контур аэорадиогеохимической зоны

Молибденовые месторождения, связанные с породами гранодиорит-гранитовой магматической формации, как правило, обнаруживают более тесную связь с породами наиболее поздних фаз интрузий кислого состава, отличающихся относительно большей радиоактивностью.

Месторождения характеризуются достаточно четкими радиогеохимическими параметрами, позволяющими использовать методику аэорадиогеохимического картирования для выделения перспективных площадей.

Широкое проявление в околоврудных породах процессов калиевого метасоматоза с образованием ортоклазовых, ортоклаз-кварцевых,



1 - лейкократовые грейзенизованные граниты; 2 - гнейсы; 3 - разломы; 4 - проявления молибдена; 5 - локальные аэроаномалии урановой природы; аномальные аэорадиогеохимические поля: 6 - урана; 7 - калия; 8 - контур аэорадиогеохимической зоны

6 7 8

монтажилонитовых-каолинитовых, березит-аргиллизитовых и гумбейтовых метасоматитов обуславливает существенное перераспределение радиоактивных элементов с образованием отмечаемых с воздуха полей повышенных концентраций калия, урана и тория. Аэорадиогеохимические поля часто имеют смешанную природу радиоактивности, что обуславливается относительным накоплением радиоактивных элементов в полевошпатовых и светлослюдистых эпигенетически измененных пород. Конфигурация зон с повышенными концентрациями элементов по данным АГС съемки обычно контролируется проникающими структурами и нередко параллельна контакту магматических тел (рис. I9).

На месторождениях молибдена с интенсивно проявленными пострудными изменениями (развитием кварцевых, кварц-карbonатных прожилков) с воздуха не всегда отмечается четкие поля повышенных концентраций калия. Для них более характерны поля повышенных концентраций урана, иногда окаймляющие массивы и выходящие во вмещающие толщи (рис. I9).

АГС методом в масштабе I:25 000 было изучено месторождение шеллит-кварц-полевошпатовой гумбейтовой формации, характеризующееся отсутствием видимой связи с магматическими породами, обнажающимися на поверхности.

Месторождение расположено в гумидной горно-таежной местности, в расчлененном рельфе с относительными превышениями до 100-250 м. Оно представлено изометричным в плане штокверком, приуроченным к

Рис. I8. Пример картирования молибденового оруденения аэорадиогеохимической зоны калий-урановой природы (грейзенизованные апограниты).

1 - лейкократовые грейзенизованные граниты; 2 - гнейсы; 3 - разломы; 4 - проявления молибдена; 5 - локальные аэроаномалии урановой природы; аномальные аэорадиогеохимические поля: 6 - урана; 7 - калия; 8 - контур аэорадиогеохимической зоны

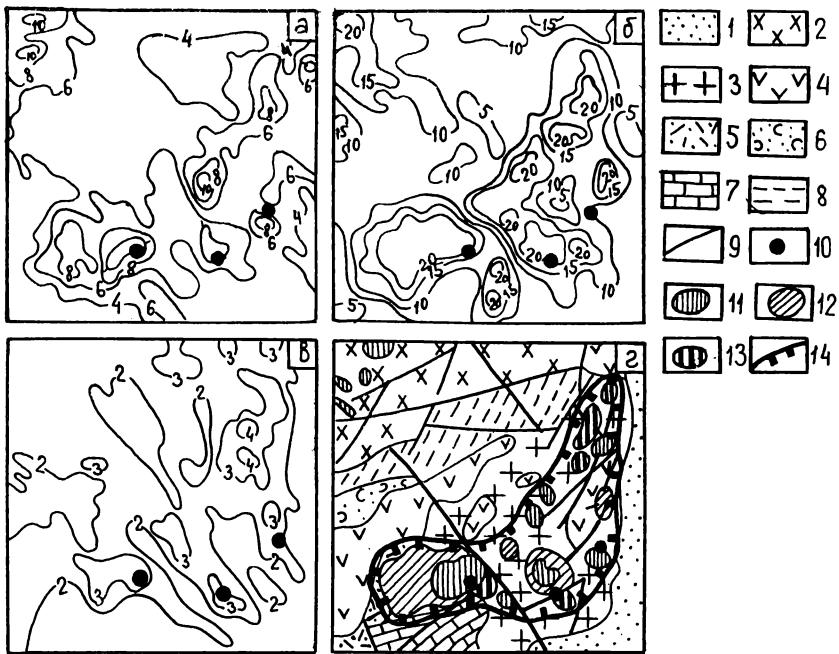


Рис.19. Результаты аэрорадиогеохимического картирования молибдено-вого оруденения в породах гранодиорит-гранитовой магматической формации.

Карты измеренных концентраций радиоактивных элементов: а - урана; б - тория; в - калия; г - аэрорадиогеохимическая карта: I - современные отложения; 2 - диориты; 3 - граниты; 4 - порфириты; 5 - туфопесчаники; 6 - туфы; 7 - известники; 8 - алевролиты; 9 - разломы; 10 - месторождения молибдена; аномальные аэрорадиогеохимические поля: II - урана; I2 - тория; I3 - калия; I4 - контур аэрорадиогеохимической зоны

песчано-сланцевой толще палеозойского возраста. Буровыми работами на глубине 350 и более метров вскрыты биотитовые неравномернозернистые граниты, не выходящие на поверхность. Для рудного поля характерно интенсивное изменение флишоидных толщ с развитием кварц-серпентитовых метасоматитов вплоть до образования серпентолитов.

По результатам воздушной съемки в пределах рудного поля установлены слабоповышенные поля урана и локальные аномалии чисто урановой природы, линейно вытянутые в направлении простирания основных рудовмещающих толщ. Содержание калия также повышается, но поля повышенных концентраций с нарушенным распределением взаимосвязей не

образует здесь широких и протяженных зон. Для месторождения типичны локальные слабоинтенсивные повышения концентраций калия, группирующиеся вблизи рудовмещающих трещин штокверка (рис.20). Сколько бы заметных повышений концентраций тория в поле месторождения не установлено.

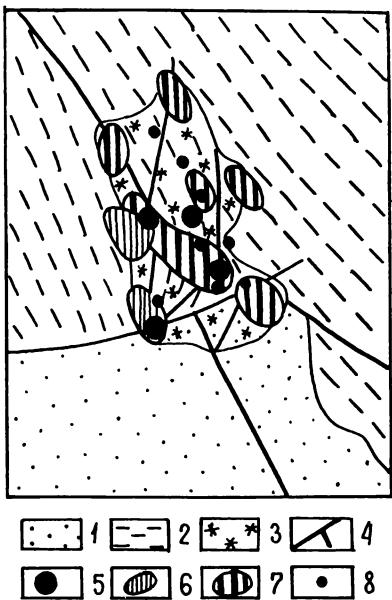


Рис.20. Схематическая аэрогеохимическая карта района вольфрамовых месторождений шеелит-кварц-полевошпатовой формации.

I - песчаники и галечные конгломераты; 2 - сланцы; 3 - кварц-серпентитовые метасоматиты; 4 - разломы; 5 - месторождения вольфрама; аномальные аэрогеохимические поля: 6 - урана; 7 - калия; 8 - локальные аэроаномалии урана с величиной торий-уранового отношения менее 2

Таким образом, наиболее характерными аэрогеохимическими признаками месторождений молибдена и вольфрама являются незначительные по размерам нелокальные слабоинтенсивные поля повышенных концентраций урана и калия, группирующиеся в пределах штокверковых зон среди лейкократовых гранитов.

5.1.2. Ртуть

В одном из степных районов АГС методом было изучено ртутное месторождение и группа сопряженных с ним рудопроявлений киноварно-аргиллизированной формации.

Район месторождения сложен вулканогенно-осадочной толщей нижнедевонского возраста, в составе которой отмечаются покровные, субвулканические и жерловые фации кислого и среднего составов, перемежающиеся с терригенными, иногда плохо сортированными обра-

зованиями. Песчаники полимиктовые зеленого цвета чередуются с туфопесчаниками и алевролитами, образуя горизонты мощностью до 10–15 метров.

Киноварь образует рудные тела, приуроченные к тектоническим согласным межформационным разрывам и оперяющим их трещинам, протягивающимся на десятки и первые сотни метров. Вдоль разрывов интенсивно развиты процессы аргиллизации. Гидротермальные изменения пород, располагаясь вдоль разломов, захватывают в целом линейно вытянутую полосу длиной около 1 км при общем протяжении зоны 6 км. Метасоматиты в основном сформировались в дорудную стадию.

По аэорадиогеохимическим данным ртутное оруденение контролируется линейно-вытянутой зоной повышенных содержаний калия, то-

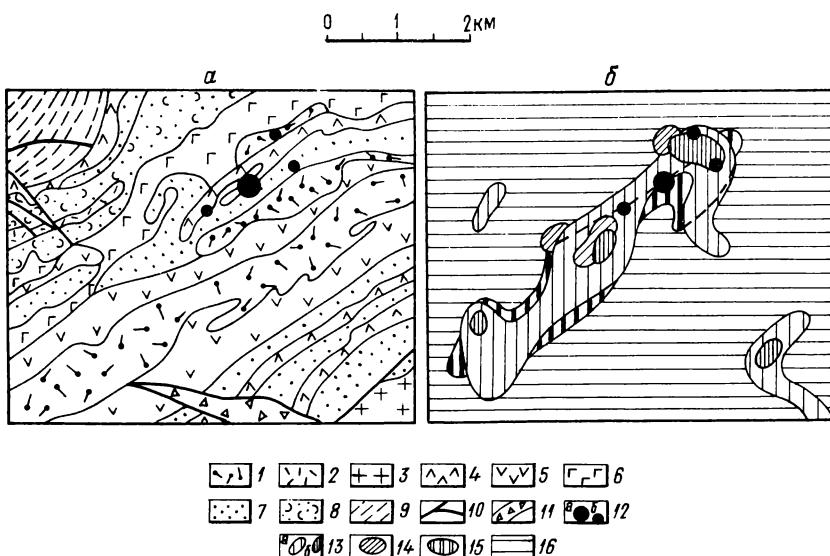


Рис.21. Геологическая (а) и аэорадиогеохимическая (б) карты района ртутного оруденения.

I – кварцевые порфиры (экструзии); 2 – кварцевые порфиры (покровы); 3 – граниты; 4 – диабазы (дайки); 5 – порфириты; 6 – габбро; 7 – песчаники; 8 – туфопесчаники, туфогравелиты; 9 – алевролиты; 10 – разломы; 11 – зоны брекчий; 12 – месторождения (а) и рудопроявления (б) киновари; 13 – аномальные аэорадиогеохимические поля: урана (13) – повышенные (а) и аномально-высокие (б); повышенные тория (14), калия (15); 16 – области фоновых концентраций урана, тория и калия

рия и урана (рис.21). Приращения калия в пределах зоны составляют 2-3%, тория 3-5·10⁻⁴%. Уран образует более локальные поля, группирующиеся в линейную зону, параллельную рудоконтролирующей структуре.

Установленные закономерности в распределении радиоактивных элементов позволяют использовать методику аэорадиогеохимического картирования для выделения аналогичных ртутных проявлений.

5.1.3. Цезий

Цезиеносные вулканогенные и вулканогенно-осадочные формации базальт-липаритового состава известны в пределах вулканических построек центрального типа в связи с эдморогенными внутриконтинентальными поясами. Они определились в качестве объектов возмож-

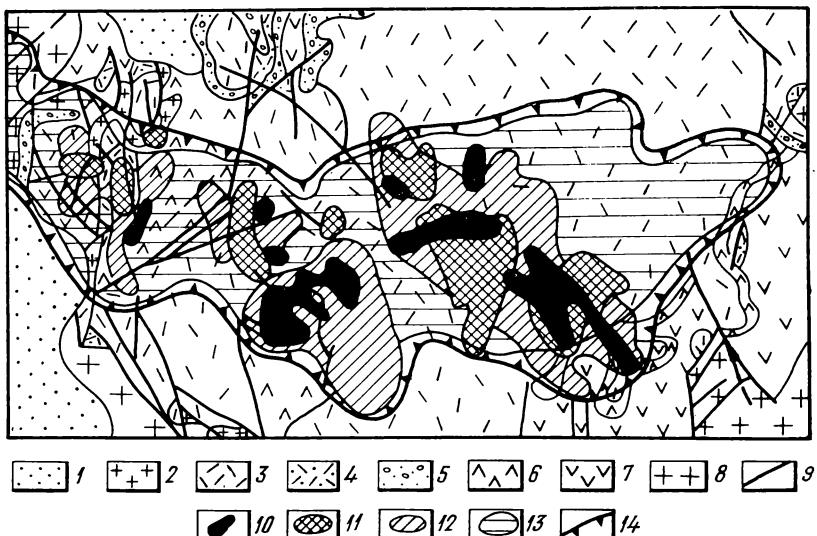


Рис.22. Аэорадиогеохимическая карта района проявления цезиевой минерализации.

I - современные отложения; 2 - гранит-порфиры; 3 - кварцевые порфиры и липариты; 4 - туфы липаритов; 5 - конгломераты; 6 - туфы среднего состава; 7 - диабазы; 8 - граниты; 9 - разломы; 10 - ореолы рассеяния цезия; аномальные аэорадиогеохимические поля: I1 - калия; I2 - тория; I3 - калия; I4 - контур аэорадиогеохимической зоны

нного промышленного изучения сравнительно недавно.

АГС съемкой в масштабе I:10 000 и I:25 000 было изучено одно месторождение в степной зоне.

Месторождение приурочено к крупной вулкано-тектонической структуре центрального типа, сформированной на гранитном фундаменте. Цезийсодержащие вулканические стекла и редкометальные витропластические туфы приурочены к основанию мощной пачки игнимбритов липаритового состава. Они образуют внутрипокровные тела в форме линз размером в первые сотни кв. м и контролируются проникаемыми структурами.

Радиогеохимический облик пород рудного поля месторождений в целом унаследован от материнских лиparитов, что подтверждается взаимной корреляцией радиоактивных элементов во вмещающих породах и рудах (рис.22). Важнейшим АГС признаком является одновременное повышение концентраций всех трех элементов, выразившееся в появлении повышенных и аномально высоких полей и локальных аномалий на фоне резкодифференцированного радиогеохимического поля, характеризующего область распространения вулканогенных пород кислого состава.

Радиогеохимическая специфика месторождения определяется интенсивно проявленными калишпатофиро-аргиллизитовыми изменениями.

5.1.4. Редкие земли

АГС методом изучено крупное месторождение редких земель, преимущественно цезиевой группы с высоким содержанием отдельных редких элементов (гадолиния, иттрия, ниobia, циркония, лантния и тория). Месторождение располагается в горном районе с широко проявленными явлениями криогенеза среди массива щелочных нефелинсодержащих пород. Массив имеет в плане округлую форму и концентрически-зональное строение. В его центре залегают нефелин-пироксеновые породы (иболиты, мельтейгиты, уртиты, якупянгиты). На западе и юго-западе нефелин-пироксеновые породы окаймлены полукольцом нефелиновых сиенитов, слагающих большую часть массива. К краям интрузии приурочены безнефелиновые порфировидные щелочные сиениты, сиенит-порфиры и эруптивные брекчи.

Вмещающие породы прорваны дайками разнообразного состава и подвергнуты разнообразным метасоматическим изменениям: нефелинизации, долевошпатизации, амфиболизации, многостадийной карбонатизации.

Процесс карбонатизации в различной степени захватывает все породы

и наиболее интенсивно проявился в центральной части массива.

Прожилки смешанного карбонатного (сидерит, реже кальцит, доломит), флюоритового и полевошпатового составов группируются здесь в полосу северо-восточного простирания длиной около 2 км при средней ширине 300–400 м. Рудные минералы прожилков представлены вкрапленностью и гнездовыми скоплениями фтор-карбонатов и фосфатов редких земель (паризит, бастнезит, рабдорфантит и др.), арсенопирита, сфалерита, галенита и пирита.

В пегматоидных обособлениях в виде гнезд и жилообразных тел небольшого размера отмечаются крупнозернистые агрегаты апатита, амфибола, пироксена с включениями лопарита, торианита, циркона, пирохлора, эвксенита и др. Оруденение представлено двумя типами: фосфатно-редкоземельно-титановым и редкоземельно-торий-ниобиевым.

На месторождении широко проявлена глубоко проработанная зона выветривания, характеризующаяся наиболее высокими содержаниями редких земель и тория.

По данным аэорадиогеохимических построений в пределах массива отмечено высокое поле контрастных содержаний урана, тория и калия (рис.23). Конфигурация полей в целом повторяет концентрически-зональное строение массива. Повышенные содержания урана, тория и калия связаны с метасоматическими изменениями щелочных нефелинсодержащих пород. Наложенные процессы полевошпатизации, карбонатизации и пегматитообразований охватывают здесь большие объемы пород и развиваются по системе многочисленных трещин северо-восточного направления и межтрещинному пространству. Они сопровождаются существенным привносом тория и урана, которые концентрируются здесь в торианите, лопарите, эвксените, апатите, сфене, ильмените, астрорифилите и обуславливают локальные аномалии ториевой и урано-ториевой природы радиоактивности.

Выявленные аэорадиогеохимические поисковые признаки ториеносных массивов могут быть рекомендованы для поисков месторождений комплексных руд редких земель, тория и ниobia в связи с массивами ультраосновных щелочных пород.

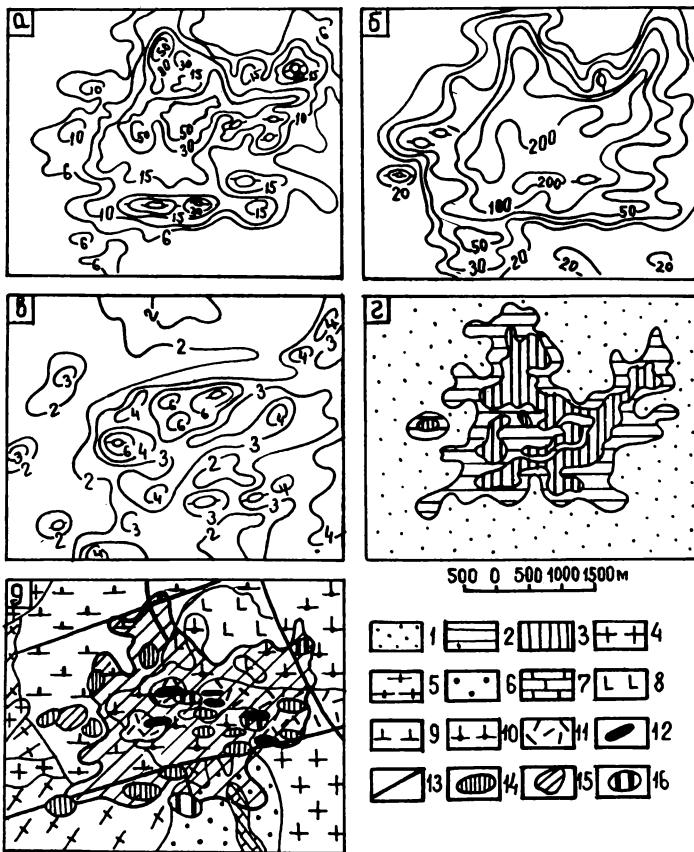


Рис.23. Результаты аэрорадиогеохимического картирования месторождения редких земель.

Карты концентраций радиоактивных элементов по данным АГС съемки: а - урана, б - тория, в - калия; г - тория по результатам обработки на ЭВМ: I - фоновые; 2 - повышенные (от $\vartheta +1,3S$ до $\vartheta +3S$); 3 - аномально высокие ($>\vartheta +3S$); д - аэрорадиогеохимическая карта: 4 - граниты; 5 - ортогнейсы; 6 - песчаники; 7 - известняки; 8 - уртит-мелтейгитовые породы; 9 - нефелиновые сиениты; 10 - щелочные лейкократовые сиениты; 11 - субщелочные эфузивы; 12 - карбонатиты; 13 - разломы, аномальные аэрорадиогеохимические поля: 14 - урана, 15 - тория, 16 - калия

5.I.5. Золото

АГС съемкой в масштабе I:25 000 было изучено рудное поле месторождения золото-кварцевой формации в одном из таежных районов с пологим рельефом и незначительными превышениями.

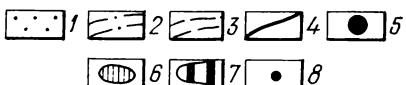
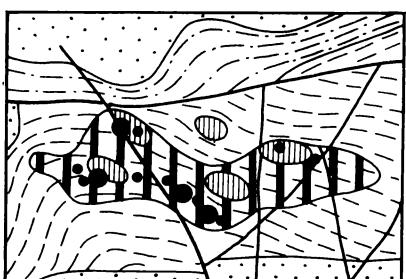
В районе месторождения широко развита островная мерзлота. Значительная часть изученных рудных тел находится на большом расстоянии от интрузивных массивов и располагается в относительно слабометаморфизованных породах. Рудное поле месторождения образовано серией линзовидных кварцевых жил, приуроченных к зонам расщленцевания в толще филлитовидных глинистых сланцев. Рудные жилы по простиранию прослежены на первые сотни метров, при мощности в первые метры. Основной жильный минерал кварц, в значительном количестве присутствуют хлорит, мусковит, апатит, полевой шпат. Кроме золота, из рудных минералов установлены в крайне небольшом количестве сульфиды: пирит, арсенопирит, сфалерит, галенит, халькопирит, висмут самородный, кассiterит. Видимое золото не является редкостью. Прослойки сланцев, заключенные в жилах кварца, иногда покрыты тончайшей пленкой золота.

Для золоторудного поля месторождения характерны интенсивные метасоматические изменения, сопровождаемые перераспределением калия и урана с образованием зон серпентизации, кварц-слюдистых и кварц-полевошпатовых метасоматитов, захватывающих большие площади (первые сотни метров).

По данным аэорадиогеохимических построений (рис.24) место-

Рис.24. Аэорадиогеохимическое картирование района с золото-кварцевым оруднением.

I - песчаники, гравелиты;
2 - хлоритовые сланцы; 3 - филлитовидные глинистые сланцы;
4 - разломы; 5 - рудопроявления золота; аномальные аэорадиогеохимические поля: 6 - урана, 7 - калия; 8 - локальные аэроаномалии урана с торий-урановым отношением менее 2,5



рождение выделяется широкими и протяженными полями повышенных концентраций калия, занимающих площади в несколько кв.км, которые непосредственно над рудными телами сменяются относительными понижениями. Концентрации урана незначительны и превышают окружающий фон на $1,5\text{--}2,5 \cdot 10^{-4}\%$. В распределении тория четких закономерностей не установлено.

Ореолы повышенных и аномальных концентраций калия (до 3,5–4% на фоне 2–2,5%) часто совпадают с групповыми полями слабоповышенных концентраций урана или локальными аномалиями урана с величиной торий–уранового отношения до 2,5.

Проведенные работы показали, что с помощью методики аэорадиогеохимического картирования возможно выделение перспективных площадей для поисков месторождений золота по аномальным и повышенным содержаниям калия.

5.2. Месторождения цветных металлов

АГС методом в аридном и горнотаежном районах в масштабе 1:25 000 были изучены три месторождения медистых песчаников, никелево–cobальто–арсенидных и свинцово–цинковых руд.

5.2.1. Медь

Аэорадиогеохимическое картирование было проведено на площади распространения медистых песчаников, залегающих в терригенно–флишевой (местами пестроцветной) формации среднего палеозоя (рис. 25).

Воздушные и наземные гамма–спектрометрические измерения выполнены в масштабе 1:25 000 в степной слабовсхолмленной местности в пределах центральной части рудного поля.

Продуктивная свита представлена пестроцветными мелко–средне–зернистыми полимиктовыми песчаниками повышенной известковистости, чередующимися с олигомиктовыми кварцевыми и магнетитовыми песчаниками, доломитами и алевролитами. В основании толщи залегает мелкогалечный конгломератовый горизонт, в низах разреза известны прослои гравелитов. Мощность толщи 400–650 м. Для рудовмещающей пачки характерны косые, преимущественно диагональные, слоистость, отпечатки ходов червей.

Литолого–фацальные особенности свидетельствуют об образовании пород в условиях мелководной зоны шельфа или дельтового мелководья.

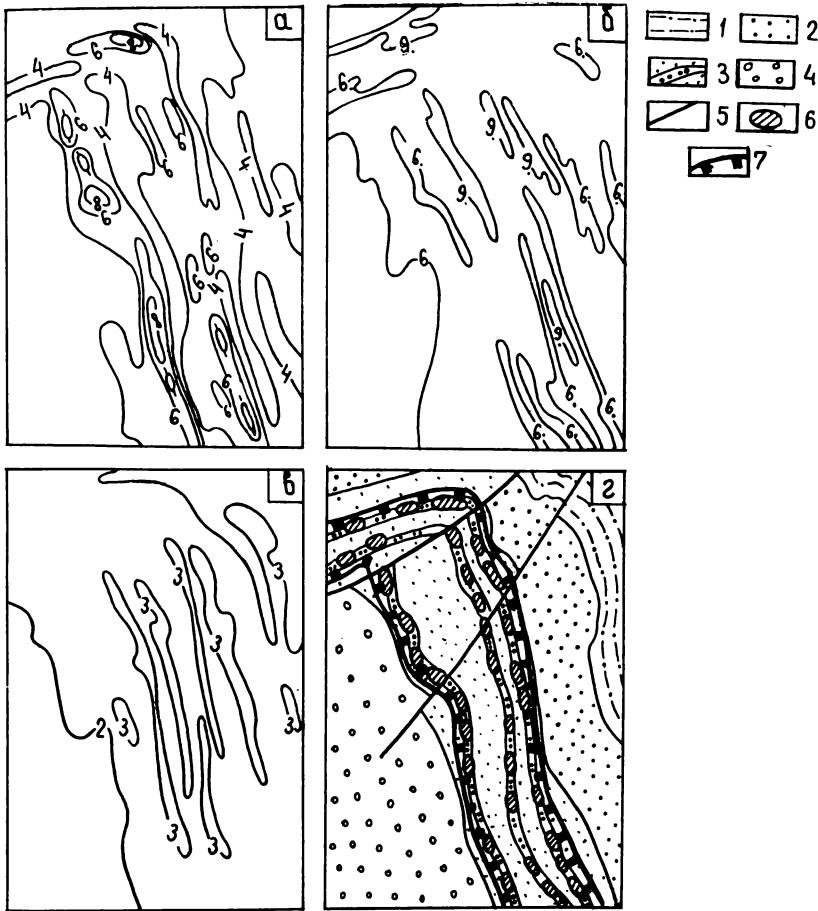


Рис.25. Результаты аэрорадиогеохимического картирования мединстых песчаников.

Карты концентраций радиоактивных элементов: а - урана, б - тория, в - калия; г - схематическая аэрорадиогеохимическая карта: 1 - алевролиты, аргиллиты; 2 - песчаники грубозернистые красно-цветные; 3 - известковистые песчаники с горизонтами мединстых песчаников; 4 - конгломераты; 5 - разломы; 6 - повышенные поля урана; 7 - граница аэрорадиогеохимической зоны

Свита смята в пологую синклинальную складку и в южной части прорвана многочисленными лайками диабазов, габбро-диабазов и порфиритов.

Оруденение приурочено к отдельным слоям песчаника и гравелита

и по простиранию не выдержано. В разрезе оруденелые горизонты разделены безрудными слоями различной мощности.

Минерализация представлена сульфидами меди (халькозин, борнит), образующими вкрапления в цементе песчаника. Иногда сульфиды развиваются по периферии обломков гравелита. На поверхности проявлены яркие минералы зоны окисления (малахит, азурит и др.). Конфигурация рудных тел в плане неправильная.

Наиболее четко проявленным аэродиагеохимическим признаком изученного месторождения являются локальные повышения концентраций урана, которые фиксируются приращениями над фоном в $1,5 - 2,0 \cdot 10^{-4}\%$ с низкой величиной торий-уранового отношения ($Tb/U < 2,5$) и небольшими по размерам полями повышенных концентраций урана (до $12-17 \cdot 10^{-4}\%$ на фоне $3,5-4,0 \cdot 10^{-4}\%$), подчиненными строгому литолого-фациональному контролю (рис.25). Повышенные концентрации калия отсутствуют, местами отмечается понижение содержаний калия на $1-1,5\%$, характеризующее области развития горизонтов сильно известковистых песчаников. Концентрации тория не отличаются от фона.

Продуктивная свита в целом четко прослеживается по аэродиагеохимическим данным цепочками повышенных полей урана (радия) при фоновых значениях тория и слабо дифференцированном содержании калия.

5.2.2. Кобальт

АГС методом было изучено трещинно-жильное месторождение никелево-кобальто-арсенидного типа.

Месторождение приурочено к экзоконтакту гранитного штока с песчано-сланцевой толщей силура, перекрытой турбогенно-эфузивными образованиями нижнего девона.

Минерализация развивается в зонах разрывных нарушений, пересекающих гранитоидную интрузию, роговики и гранатовые скарны экзоконтактовой зоны. Основные рудные тела жильного типа локализованы в средней части слоистой песчано-сланцевой толщи силура на участках развития гранатовых, гранат-пироксеновых и роговообманково-гранатовых скарнов.

В составе руд преобладают арсениды никеля и кобальта (раммельсбергит, шмальтин, хлоантит), арсениды кобальта и железа (саффирит, леллингит и др.), сульфиды меди (блеклая руда, халькопирит). Отмечается примесь самородного висмута и серебра.

Жильные минералы представлены исключительно карбонатами (кальцит, доломит, анкерит, сидерит), реже встречается кварц, иногда

барит.

По аэорадиогеохимическим данным месторождение отмечается широким полем повышенных и аномально высоких концентраций калия, связанных с развитием светлослюдистых изменений в песчаниках и алевролитах силура в зоне ороговикования. На общем фоне относительно повышенных концентраций калия зоны скарнирования и непосредственно жильные карбонатные рудные тела фиксируются локальными минимумами с уменьшением концентраций калия на 1,5-2,5%, сопровождающимися локальными повышениями концентраций урана и тория (рис. 26).

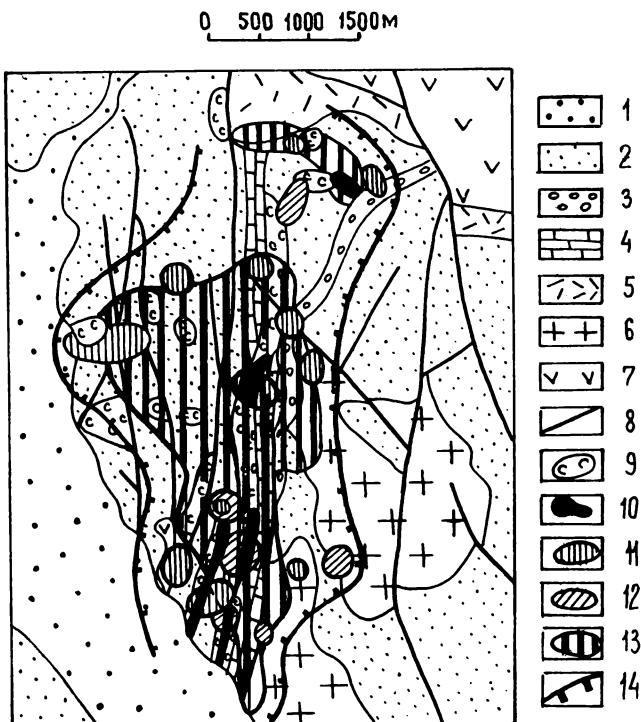


Рис.26. Аэорадиогеохимическая карта рудного поля месторождения кобальта.

I - современные отложения; 2 - песчаники; 3 - конгломераты;
4 - скарнированные известняки; 5 - кислые эфузивы; 6 - граниты;
7 - порфириты; 8 - разломы; 9 - оруденелые скарны; 10 - рудные тела;
повышенные и аномально-высокие аэорадиогеохимические поля;
11 - урана, 12 - тория, 13 - калия; 14 - контур аэорадиогеохимической зоны

По периферии повышенного поля калия группируются локальные и нелокальные поля повышенных концентраций урана (до $15 \cdot 10^{-4}\%$ на фоне $3-5 \cdot 10^{-4}\%$).

Содержания тория резко дифференцированы. В одних случаях они совмещены с ореолами концентраций калия, связанными с ороговико-ванными песчаниками, в других - приурочены к краевым частям скарнированных известняков и известковистых песчаников. Концентрации тория достигают $25-30 \cdot 10^{-4}\%$ при фоне $10-12 \cdot 10^{-4}\%$. Таким образом, изученное месторождение кобальта по аэрорадиогеохимическим данным выделяется специфическими полями повышенных содержаний радиоактивных элементов, которые могут быть использованы в качестве поисковых признаков месторождений кобальтовых руд.

5.2.3. Свинец и цинк

Аэрорадиогеохимические признаки месторождений свинца и цинка скарнового типа были изучены в одном из районов палеозойской складчатой области (рис.27).

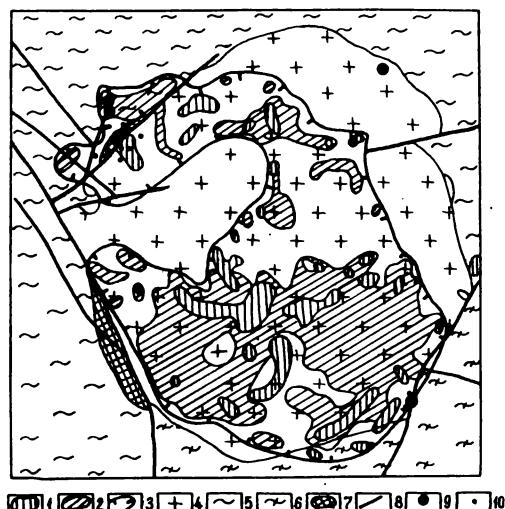


Рис.27. Схематическая аэrorадиогеохимическая карта района свинцово-цинкового месторождения.

Повышенные и аномально-высокие аэrorадиогеохимические поля: 1 - урана, 2 - тория; 3 - контур аэrorадиогеохимической зоны; 4 - лейкократовые граниты; 5 - терригенно-карбонатные породы; 6 - гнейсы; 7 - скарнированные породы; 8 - разломы; 9 - свинцово-цинково-медное оруднение; 10 - локальные аэроаномалии урана

Изученное месторождение располагается в контакте массива лейкократовых гранитоидов с терригенно-карбонатными породами кембрия.

Оруднение пространственно и парагенетически связано с зоной скарнирования, расположенной в западной части гранитного массива.

Рудные тела имеют секущую форму и представлены жильными и столбообразными залежами галенит-сфalerит-халькопиритовых руд, локализованных в секущих северо-восточных зонах трещиноватости.

Аэродиагеохимические особенности рудного поля в значительной мере маскируются повышенными концентрациями урана и тория в лейкократовых грейзенизированных гранитах. Фоновые концентрации урана в пределах массива по АГС данным составляют $5\text{--}6 \cdot 10^{-4}\%$, аномальные - $15\text{--}30 \cdot 10^{-4}\%$; фоновые содержания тория - $15\text{--}25 \cdot 10^{-4}\%$, аномальные - $50\text{--}70 \cdot 10^{-4}\%$, содержания калия близки к $3,5\text{--}4\%$. Поля аномальных концентраций радиоактивных элементов обусловлены, в основном, интенсивной грейзенизацией и развитием кварц-серпентитовых метасоматитов в теле гранитной интрузии.

Собственно рудные зоны со свинцово-цинковой минерализацией характеризуются относительными понижениями концентраций тория и калия и сопровождаются локальными аномальными концентрациями урана (до $50\text{--}70 \cdot 10^{-4}\%$) с низким торий-урновым отношением ($T_{\text{H}}/\text{U} < 2$).

Таким образом, отличительными аэродиагеохимическими признаками скарновой свинцово-цинковой минерализации является наличие локальных урановых аномалий на фоне относительных понижений концентраций тория и калия.

5.3. Месторождения черных металлов

5.3.1. Комплексные редкоземельно-флюорито-барито-железные руды

Район месторождения комплексных редкоземельно-флюорито-барито-железных руд был изучен АГС съемкой в масштабе I:25 000, а рудное поле месторождения АГС съемкой в масштабе I:10 000 (рис.28).

В геологическом строении района принимает участие эфузивно-осадочная толща, трансгрессивно перекрытая более молодой песчанико-алевролитовой свитой.

Месторождение пространственно приурочено к телам эруптивных брекчий, прорывающих породы фундамента. Трубообразные тела брекчий сечением в первые кв.км прослежены на глубину более 1,5 км, имеют крутопадающие контакты ($65\text{--}90^\circ$) и контролируют размещение комплексного железорудного оруденения. Тела брекчий представлены грубообломочным материалом, сцементированным сидеритом, баритом и флюоритом. В обломках брекчий присутствуют аляскитовые граниты, габбро, сиениты, хлоритовые сланцы, песчаники, алевролиты, гравелиты.

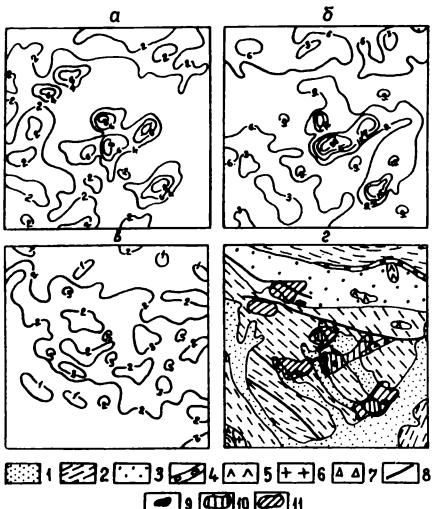


Рис.28. Результаты аэрорадиогеохимического картирования месторождения комплексных редкоземельно-флюорито-барито-железных руд.

Карты концентраций радиоактивных элементов по данным АГС съемки: а - урана, б - тория, в - калия; г - аэрорадиогеохимическая карта: 1 - современные отложения; 2 - сланцы, песчаники; 3 - терригенные отложения; 4 - конгломераты; 5 - дайки диабазов; 6 - граниты; 7 - брекчии; 8 - разломы; 9 - рудные тела; аномальные аэрорадиогеохимические поля: 10 - урана, II - тория

В пределах месторождения известно восемь трубообразных тел брекчий. В плане рудные тела имеют изометричную форму. Параметры залежей с глубиной мало меняются. Зона окисления прослежена на глубину до 100–300 м.

Первичные руды состоят из сидерита, флюорита, барита, гематита, небольшой примеси пирита, изредка встречаются молибденит, марказит, халькопирит, галенит и монацит.

Окисленные руды состоят из гематита, гидрогетита, флюорита, барита с примесью бастнезита, кварца, сидерита, целестина, стронцианита, пиролузита.

Вмещающие породы изменены незначительно. При этом отмечены процессы окремнения, серпентизации, карбонатизации и каолинизации.

По аэрорадиогеохимическим данным площадь месторождения в целом характеризуется интенсивными контрастными полями аномальных содержаний тория, урана и дифференцированными концентрациями калия.

Наиболее распространенные фоновые концентрации урана по аэроданным в рудном поле составляют $2\text{--}3 \cdot 10^{-4}\%$, повышенные – $4\text{--}8 \cdot 10^{-4}\%$ и аномальные – до $12\text{--}25 \cdot 10^{-4}\%$ в локальных точках. Повышенные поля урана преобладают на флангах рудных тел. Повышенные концентрации тория приурочены к центральным частям эруптивных брекчий. Концентрация урана вблизи рудных тел месторождения изменяется от $12 - 15 \cdot 10^{-4}\%$ до $20\text{--}25 \cdot 10^{-4}\%$ на фоне от $3\text{--}6$ до $9 \cdot 10^{-4}\%$. Наиболее рас-

пространственные содержания калия для рудных брекчий составляют 1,5–2% на фоне 2,5–3,5% для вмещающих пород.

Поля аномальных концентраций радиоактивных элементов изометричной формы пространственно сближены между собой, нередко совмещены и группируются вблизи рудных тел и зон околоврудных метасоматических изменений.

Наиболее характерными аэrorадиогеохимическими признаками подобных месторождений следует считать контрастные, изометричной формы, совмещенные поля надфоновых концентраций тория и урана при слабо дифференцированных содержаниях калия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как показали результаты проведенных исследований, методика аэrorадиогеохимического картирования, разработанная для поисков и прогнозирования радиоактивного сырья, имеет универсальный характер и может найти широкое применение при поисках месторождений твердых полезных ископаемых: цветных, редких и благородных металлов, фосфоритов, бокситов, плавикового шпата.

Рассмотренные в работе вопросы аэrorадиогеохимического картирования нельзя считать окончательно завершенными. Они требуют дальнейшего усовершенствования и более широкого опробования в производственных подразделениях Мингео СССР.

Недостаточно разработанными представляются особенности применения аэrorадиогеохимического картирования для поисков и прогнозирования полезных ископаемых в некоторых северных районах СССР.

Нуждается в специальной разработке проблема оценки прогнозных запасов месторождений полезных ископаемых и прежде всего радиоактивного сырья по аэrorадиогеохимическим данным.

Составление аэrorадиогеохимических карт в производственных подразделениях необходимо проводить параллельно с изучением и систематизацией прямых и косвенных радиогеохимических признаков основных промышленных типов месторождений полезных ископаемых (создание бланка данных).

Использование сведений о корреляционных связях радиоактивных элементов в горных породах, рудных ореолах и перекрывающих их рыхлых образованиях при составлении аэrorадиогеохимических карт позволит повысить достоверность прогнозных исследований.

Более широкая автоматизация процесса составления аэrorадиогеохимических карт, облегчив труд, повысит геологическую эффективность аэrorадиогеохимического картирования для поисков и прогнозирования широкого круга месторождений полезных ископаемых.

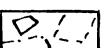
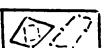
Приложение I

МАКЕТ ОФОРМЛЕНИЯ АЭРОРАДИОГЕОХИМИЧЕСКОЙ КАРТЫ

НАЗВАНИЕ АЭРОРАДИОГЕОХИМИЧЕСКОЙ КАРТЫ

(масштаб, материалы составления, составители, редакторы, год составления)

КАРТОГРАММЫ ИСПОЛЬЗОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ



I Геолого-Формационная основа



II Аэрогамма-спектрометрические съемки



III Наземные геохимические исследования



СХЕМА РАСПОЛОЖЕНИЯ ЛИСТОВ КАРТЫ

II	I
III	

I, 2, 3 - условные обозначения к картограммам

СОДЕРЖАНИЕ УРАНА И ТОРИЯ В ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ФОРМАЦИЯХ
осадочные, вулканогенно-магматические
осадочные формации

(раскрашиваются по шкале геохимического фона
на основе стратиграфической колонки)

уран

торий

○ ○	○ ○
— —	— —
▼ ▼	▼ ▼
— —	— —
— —	— —
..
< <	< <
— —	— —
* *	* *

уран торий

++ ++	++ ++
— —	— —
— —	— —
— —	— —

(может быть вынесено в
заголовок оформление)

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ К АЭРОРАДИОГЕОХИМИЧЕСКОЙ КАРТЕ
ПО АГС ДАННЫМ

ГЕОХИМИЧЕСКАЯ НАГРУЗКА
РАДИОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОБЛАСТИ

- А. Интенсивно дифференцированные
- Б. Дифференцированные
- В. Умеренно дифференцированные
- Г. Слабо дифференцированные

ГРАНИЦЫ ЗОН (БЛОКОВ)

НАРУШЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
(радиогеохимические зоны (блоки) первого порядка)

- (красная) торий-урановые, существенно ураноносные
- (синяя) урано-ториевые, существенно ториеносные
- (зеленая) смешанной природы радиоактивности

ГРАНИЦЫ ЗОН (БЛОКОВ)

ПРЕИМУЩЕСТВЕННОГО ПРИВНОСА РАДИОАКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
(радиогеохимические зоны (блоки) второго порядка)

- (красная) торий-урановые, существенно ураноносные
- (синяя) урано-ториевые, существенно ториеносные
- (зеленая) смешанной природы радиоактивности

ГРАНИЦЫ ЗОН (БЛОКОВ)

ПРЕИМУЩЕСТВЕННОГО ВЫНОСА РАДИОАКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
(радиогеохимические зоны (блоки) второго порядка,
используются в ограниченных случаях)

- урановые (красная)
- ториевые (синяя)
- смешанной природы (зеленая)

Все зоны нумеруются, приводится их название

РУДНЫЕ ПРОЯВЛЕНИЯ

	урана	тория	урano-ториевые	
месторождения	○	○	○	(форма значка выбирается в зависимости от генетического типа оруднения)
рудопроявления	○	○	○	
проявления	○	○	○	
аномалии	○	○	○	(аномалии подразделяют по величине отношения тория к урану в соответствии с требованиями технической инструкции [25])
	красный	синий	красно-синий	

ГРАНИЦЫ ГЕОХИМИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

A. В пределах геохимического фона по урану (радио)

 черный цвет

B. В пределах аномальных полей в горных породах

аномальные содержания

более ($q + 3S$)

красный 

синий 

зеленый 

повышенные содержания

более ($q + 1,3S$)

красный 

синий 

зеленый 

по урану

по торию

по калию

B. В пределах аномальных полей в рыхлых отложениях

аномальные содержания

повышенные содержания

красный 

красный 

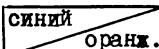
ИНТЕРВАЛЫ СОДЕРЖАНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ В ГОРНЫХ ПОРОДАХ ($10^{-4}\%$)

(в пределах геохимического фона)

уран I	1,5	2,5	3,5	5	7	10	15	20
--------	-----	-----	-----	---	---	----	----	----

т.синий	голубой	зеленый	желтый	оранж.	красный	малинов.	т.малин.
---------	---------	---------	--------	--------	---------	----------	----------

торий 0	3	6	9	12	15	20	25	30
---------	---	---	---	----	----	----	----	----


 синий
 оранж.

содержание урана в геохимически неоднородных формациях (чертедование цветов, соответствующих пределу содержаний элементов в формации)

ГЕОЛОГО-ФОРМАЦИОННАЯ НАГРУЗКА

ОСАДОЧНЫЕ, МЕТАМОРФИЧЕСКИЕ, МЕТАМОРФИЗОВАННЫЕ,

МАГМАТИЧЕСКИЕ ФОРМАЦИИ

Геотектонический режим	Геологические формации	Индекс возраста	Название свит, толщ	Обозначения
------------------------	------------------------	-----------------	---------------------	-------------

В соответствии с существующими обозначениями

(может сопровождаться таблицей статистических параметров распределения радиоактивных элементов).

ПРОЧИЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

(рядовая минерализация, геологические границы, тектонические нарушения и т.д.).

Примечание. На картограммах использованных АГС материалов отражается масштаб съемки, тип аэрогеофизической аппаратуры, объем кристаллического детектора.

Приложение 2

СРАВНЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ АГС ДАННЫХ ОТДЕЛЬНЫХ ВЫЛЕТОВ

Как показано в разделе 3.2, АГС данные, полученные со значительной площади в пределах неизмененных горных пород, как правило, не противоречат многомерному нормальному распределению. Поэтому задача сравнения распределений АГС данных отдельных вылетов сводится к проверке равенства соответствующих ковариационных матриц $\left[\sum^2 \right]$ и векторов средних значений \bar{q} аэрогеохимических параметров.

Равенство ковариационных матриц можно проверить с помощью "критерия обобщенных дисперсий", являющегося многомерным эквивалентом F -критерия Фишера [12].

Пусть мы имеем "к" групп наблюдений (данные отдельных вылетов) по m переменным. Требуется проверить нулевую гипотезу

$$H_0 : \left[\sum^2_1 \right] = \left[\sum^2_2 \right] = \dots = \left[\sum^2_k \right]$$

при альтернативе

$$H_1 : \left[\sum^2 \right] \neq \left[\sum^2 \right]$$

Оценкой ковариационной матрицы $\left[\sum^2 \right]$ i -ой совокупности является матрица $\left[S_i^2 \right]$, определяемая из соотношения

$$\left[S_i^2 \right] = \frac{\left[P_i \right]}{(n_i - 1)}, \quad (1)$$

где $\left[P_i \right]$ – матрица сумм квадратов и смешанных произведений гамма-спектрометрических наблюдений по i -у вылету, элементы которой вычисляются по формуле 3.18; n_i – количество дискретных измерений в i -ом вылете.

Если исходные совокупности, изученные "к" вылетами, идентичны, то данные этих вылетов можно объединить с целью получения обобщенной оценки ковариационной матрицы $\left[S_p^2 \right]$ по формуле

$$\left[S_p^2 \right] = \sum_{i=1}^k \frac{(n_i - 1) \left[S_i^2 \right]}{\left(\sum_{i=1}^k n_i \right) - K}, \quad (2)$$

где $\sum_{i=1}^k n_i$ – общее количество измерений по "к" вылетам.

Для $k=2$ (основной случай в практике обработки АГС информации по

описываемой методике) формула 2 примет вид

$$\left[S_p^2 \right] = \frac{1}{n_1 + n_2 - 2} ([P_1] + [P_2]). \quad (3)$$

Далее вычисляется статистика

$$M = \left[\left(\sum_{i=1}^k n_i \right) - K \right] \ell_n \left| S_p^2 \right| - \sum_{i=1}^k \left[(n_i - 1) \ell_{n_i} \left| S_i^2 \right| \right]. \quad (4)$$

При "к" и m не более 5 и числе наблюдений по вылету не менее 20 (условия, которые в данном случае всегда выполняются) распределение статистики M хорошо аппроксимируется χ^2 распределением с $\nu = \frac{1}{2} (k-1)m (m+1)$ степенями свободы

$$\chi^2 = M \cdot C^{-1}, \quad (5)$$

где

$$C^{-1} = 1 - \frac{(2m^2 + 3m - 1)}{6(m+1)(k-1)} \left(\sum_{i=1}^k \frac{1}{n_i - 1} - \frac{1}{\left(\sum_{i=1}^k n_i \right) - K} \right).$$

Если вычисленное значение $\chi^2 \leq \chi^2_{\alpha}, \nu$, то различие сравниваемых ковариационных матриц можно считать незначимым и для окончательного заключения о близости распределений необходимо проверить гипотезу о равенстве многомерных средних.

Рассмотрим случай, когда $k=2$, т.е. нулевая гипотеза будет

$$H_0: [\mu_1] = [\mu_2],$$

при альтернативе

$$H_1: [\mu_1] \neq [\mu_2].$$

Проверку этой гипотезы можно выполнить с помощью T^2 статистики Хоттинга, которая вычисляется по формуле [12]

$$T^2 = \frac{n_1 n_2}{n_1 + n_2} \left[\bar{q}_1 - \bar{q}_2 \right] \left[S_p^2 \right]^{-1} \left[\bar{q}_1 - \bar{q}_2 \right]. \quad (6)$$

Для определения критического значения T^2 статистики обычно используют F -распределение

$$F = \frac{n_1 + n_2 - m - 1}{(n_1 + n_2 - 2)m} T^2, \quad (7)$$

с m и $(n_1 + n_2 - m - 1)$ степенями свободы.

Если нулевая гипотеза подтверждается, то различия в сравниваемых распределениях значений аэрогеохимических признаков можно считать незначимыми и результаты измерений по обоим вылетам объединяются в единую выборку. Обобщенные ковариационная матрица и вектор средних значений АГС параметров вновь полученной выборки аналогично сравниваются далее с ковариационной матрицей и вектором средних следующего вылета. При выполнении условий H_0 АГС данные по этому вылету также включаются в объединенную выборку и т.д. При этом с каждым новым вылетом соответственно наращивается сводная радиогеохимическая карта.

Если же для отдельных вылетов (групп данных) условия H_0 не подтвердились, построить единую сводную карту аномальных концентраций какого-либо элемента можно только вычислив R , \bar{g} и S по объединенной на всю площасть выборке, т.е. после завершения летных работ на участке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аэрогамма-спектрометрический метод поисков слабопроявленных месторождений урана/А.И.Краснов, Е.Б.Высокоостровская, В.А. Смирнов и др. Л.: Недра, 1975. - 157 с.
2. Аэрогамма-спектрометрический метод поисков рудных месторождений/В.П.Воробьев, А.В.Буфимов, Л.Н.Вавилин и др. Л.: Недра, 1977. - 215 с.
3. Аэрогеофизические методы прогнозирования месторождений урана/А.И.Краснов, Е.Б.Высокоостровская, В.А.Смирнов и др. М.: Атомиздат, 1980. - 129 с.
4. Аэрогамма-спектрометрия в геологии/Л.Н.Вавилин, В.П.Воробьев, А.В.Буфимов и др. Л.: Недра, 1982. - 271 с.
5. Белонин М.Д., Голубева В.А., Скублов Г.Т. Факторный анализ в геологии. М.: Недра, 1982. - 269 с.
6. Бондаренко В.Н. Статистические решения некоторых задач геологии. М., 1970. - 245 с.
7. Большев Л.Н., Смирнов Н.В. Таблица математической статистики. М.: Наука, 1965. - 464 с.
8. Вавилин Л.Н., Высокоостровская Е.Б. К вопросу учета климатических и ландшафтно-геохимических условий при аэрогамма-спектрометрической съемке. - Методы рудной геофизики. Л., 1977, с.100-112.
9. Верховская Л.А. Интерпретация выборочного коэффициента корреляции, вычисленного для неоднородной геохимической ассоциации. Экспресс-информация ВИЭМС, сер."Математические методы исследований в геологии", 1973, № 2, с.8-20.
10. Геохимические карты и их использование при поисках рудных месторождений. Тез.докл.школы передового опыта МГ СССР, часть П. Хабаровск, 1979. - 112 с.
11. Девис Дж. Статистика и анализ геологических данных. М.: Мир, 1977. - 571 с.
12. Зеленецкий Д.С., Высокоостровская Е.Б., Бобрицкий Д.П. Интерпретация аэрогеофизических данных на основе использования понятия количества информации. - Методы рудной геофизики, 1972, вып.10, с.23-24.
13. Зеленецкий Д.С., Горланов В.В. О выделении полезного сигнала при обработке аэрогамма-спектрометрических материалов. - Методы рудной геофизики, 1972, вып.10, с.78-82.

- I4. Критерии прогнозной оценки территорий на твердые полезные ископаемые/Под ред.Д.В.Рундквист. Л.: Недра, 1978. - 605 с.
- I5. Методические рекомендации по программированию бортового интерпретационного устройства ИКА-2/В.П.Воробьев, А.В.Брылов, П.Н.Фогт. Л.: НГО "Рудгеофизика", 1981. - 25 с.
- I6. Методические указания по геологической съемке масштаба 1:50 000 (геофизические исследования). Л.: Недра, 1970, вып.7.
- I7. Мягков В.Ф. Геохимический метод парагенетического анализа руд (разработка и экспериментально-теоретическое обоснование). Автореф. на соиск. уч.степ. д-ра г.-м.н. М., 1974. - 54 с.
- I8. Основные принципы и методика радиогеохимического картирования горных пород. - Тр.ВСЕГЕИ. Новая серия, 1968, т.164. - 136 с.
- I9. Островский Э.Я. Аэрогамма-спектрометрический метод поисков месторождений нерадиоактивных руд. М.: Недра, 1977. - 73 с.
20. Плющев Е.В. Уран и торий при гидротермальном метаморфизме пород. В сб.: Радиоактивные элементы в горных породах. Л.: Наука, с.161-166.
21. Плющев Е.В. Прогнозное значение региональной гидротермально-метасоматической зональности. Матер.сов. "Основы научного прогноза месторождений рудных и нерудных полезных ископаемых". Л., 1971, с.125-127.
22. Принципы и методика геохимических исследований при прогнозировании и поисках рудных месторождений. Методические рекомендации/Под ред.А.А.Смылова, В.А.Рудника, Н.М.Динкова, А.И. Понайотова. Л.: Недра, 1979. - 247 с.
23. Радиогеохимические исследования. Методические рекомендации/ А.А.Смылов, В.К.Титов, И.Б.Савинова и др. М., 1974. - 141 с.
24. Смирнов Б.И. Статистические методы выделения ассоциаций элементов и минералов. Обзор ВИЭМС. Сер. "Мат.методы исслед. в геол.". М., 1975. - 62 с.
25. Техническая инструкция по аэрогамма-спектрометрической съемке. М., Мингео СССР, 1977. - 188 с.
26. Ткачев Ю.А., Юдович Я.Э. Статистическая обработка геохимических данных. Л.: Наука, 1975. - 232 с.
27. Харман Г. Современный факторный анализ. М.: Статистика, 1972.
28. Duval I.S. High sensitivity gamma-ray spectrometry state of the art and trial application of factor analysis. - Geophysics, 1977, v.42, №3, p.549-559.

29. Duval I.S. Statistical interpretation of airborne gamma-ray spectrometric data using factor analysis. Exploration for uranium ore deposits. Vienna, 1976, p.71-80.
30. Pirkle F.L. Interpretation of aerial radiometrics using principal components analysis and discriminating analysis. - Geophysics, 1982, v.47, №4, p.508.
31. Pirkle F.L., Campbell K., Werksung G.W. Principal components analysis as a tool for interpreting NURE aerial radiometric survey data. - J. of Geology, 1980, v.88, №1, p.57-64.

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
ВВЕДЕНИЕ.....	3
Глава 1. ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ АЭРОРАДИОГЕОХИМИЧЕСКОГО КАРТИРОВАНИЯ.....	5
I.1. Общие положения.....	5
I.2. Требования к составлению вспомогательных основ аэорадиохимических карт.....	7
I.2.1. Ландшафтная основа.....	7
I.2.2. Геологическая основа.....	9
I.2.3. Аэрогамма-спектрометрические данные.....	II
I.3. Методика составления аэорадиохимических карт вручную.....	II
I.3.1. Крупномасштабные аэорадиохимические карты.....	II
I.3.2. Средне- и мелкомасштабные аэорадиохимические карты.....	18
Глава 2. МЕТОДИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПОСТРОЕНИЯ РАДИОГЕОХИМИЧЕСКИХ КАРТ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНТЕРПРЕТАТОРА КЛАССИФИЦИРУЮЩЕГО АЭРОГЕОФИЗИЧЕСКОГО (ИКА-2).....	19
2.1. Общие положения.....	19
2.2. Подготовка АГС данных для использования в аппаратуре ИКА-2.....	24
2.3. Настройка интерпретатора ИКА-2.....	29
2.4. Применение интерпретатора ИКА-2.....	35
Глава 3. МЕТОДИКА АЭРОРАДИОГЕОХИМИЧЕСКОГО КАРТИРОВАНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭВМ.....	38
3.1. Автоматизированное построение аэорадиохимических карт на геолого-ландшафтной основе..	39
3.2. Автоматизированное построение аэорадиохимических карт на основе компонентного анализа АГС данных.....	46
3.3. Представление локальных АГС аномалий на аэорадиохимических картах.....	59
Глава 4. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ АЭРОРАДИОГЕОХИМИЧЕСКИХ ПОСТРОЕНИЙ.....	63
4.1. Общие положения.....	63
4.2. Некоторые особенности анализа аэорадиохимических построений при поисках месторождений радиоактивных элементов.....	65

Глава 5. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДИКИ АЭРОРАДИОГЕОХИМИЧЕСКОГО КАРТИРОВАНИЯ ПРИ ПРОГНОЗИРОВАНИИ И ПОИСКАХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ.....	73
5.1. Месторождения редких и благородных металлов.....	74
5.1.1. Молибден и вольфрам.....	74
5.1.2. Ртуть.....	79
5.1.3. Цезий.....	81
5.1.4. Редкие земли.....	82
5.1.5. Золото.....	85
5.2. Месторождения цветных металлов.....	86
5.2.1. Медь.....	86
5.2.2. Кобальт.....	88
5.2.3. Свинец и цинк.....	90
5.3. Месторождения черных металлов.....	91
5.3.1. Комплексные редкоземельно-флюорито-барито-железные руды.....	91
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	93
Приложение I. МАКЕТ ОФОРМЛЕНИЯ АЭРОРАДИОГЕОХИМИЧЕСКОЙ КАРТЫ.....	94
Приложение 2. СРАВНЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ АГС ДАННЫХ ОТДЕЛЬНЫХ ВЫЛЕТОВ.....	97
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	100

Редактор К.Г.Самойлов

Технический редактор Е.Б.Павлова

Подписано в печать 30.12.1983 г.

М-28II4

Формат 60x90 I/16

Печ.л 6,75

Уч.-изд.л.7,0

Тираж 500 экз.

Заказ 276

Цена 70 к.

Научно-производственное объединение "Рудгеофизика"

Типография № 2 Ленуприздана, Ленинград, 192104, Литейный пр., 55