

МИНИСТЕРСТВО ГЕОЛОГИИ СССР

**ПРИМЕНЕНИЕ КОДОВЫХ АЭРОГАММА-
СПЕКТРОМЕТРОВ И УНИВЕРСАЛЬНЫХ
ЭВМ ПРИ ПОИСКАХ РУДНЫХ
МЕСТОРОЖДЕНИЙ
(Сборник научных трудов)**

Москва 1976

1654

**ПРИМЕНЕНИЕ КОДОВЫХ АЭРОГАММА-
СПЕКТРОМЕТРОВ И УНИВЕРСАЛЬНЫХ
ЭВМ ПРИ ПОИСКАХ РУДНЫХ
МЕСТОРОЖДЕНИЙ**

(Сборник научных трудов)

Москва 1976



Научный редактор Э. Я. Островский



Москва 1970

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	4
Э.Я.Островский. Целевая функция аэрогамма-спектрометрического /АГСМ/ метода в системе геологических исследований	6
Э.Я.Островский, В.С.Бладинский, Ф.М.Персиц, Д.В.Калмыков, В.М.Пономарев, Е.С.Горелик. Автоматизированная система обработки данных аэрогамма-спектрометрических съемок - "Аэропоиск-2"	30
А.М.Портнов, О калиевой специализации рудообразующих процессов	40
В.И.Кухтин, Ю.Г.Старников, Аэрогамма-спектрометрический метод при поисках рудных зон в пределах Охотско-Чукотского вулканогенного пояса	51
И.Г.Кремнев, Э.Я.Островский, Л.Н.Котляревский. Индикация продуктивных метасоматитов при аэрогамма-спектрометрических исследованиях в Восточном Узбекистане	59
Д.В.Калмыков, Г.З.Гриневицкий. Применение кодового аэрогамма-спектрометра АГС-4К и алгоритма "Аэропоиск-2" при поисках золота /на примере одного из участков Охотско-Чукотского вулканогенного пояса/	73
Ф.М.Персиц. Современное состояние аэрогамма-спектрометрического метода за рубежом /краткий обзор/; результаты испытаний спектрометра DiGRS -3001	79

ПРЕДИСЛОВИЕ

Изучение поля радиоактивного гамма-излучения горных пород в приземной части атмосферы с целью поисков месторождений полезных ископаемых имеет сравнительно короткую /30 лет/ но достаточно напряженную историю развития. В ней можно выделить три основных этапа. Первый — с 1946 по 1964 гг. — характеризуется использованием аэрогамма-радиометрического метода исключительно для поисков месторождений радиоактивного сырья. Датчики радиометров — газонаполненные счетчики. Индикатор аномальности — величина интенсивности регистрируемого поля интегральной радиоактивности с учетом локальности аномального "пика".

Второй этап — с 1964 по 1971 гг. — становление аэрогамма-спектрометрического /АГСМ/ метода поисков. Датчики гамма-спектрометров — неорганические и органические сцинтилляторы. Главным объектом поисков по-прежнему остаются месторождения радиоактивных руд. Но наряду с этим главным направлением появляются исследования возможностей АГСМ-метода при поисках месторождений нерадиоактивных руд. Усложняется индикатор аномальности. В него входят наряду с параметрами интенсивности и локальности аномального "пика" значения всевозможных индикаторных отношений: U/Th , $Th+U/K$, $K-U/Th$ и т.д.

И, наконец, третий этап развития. Он начинается с 1971 года, с появлением первых отечественных кодовых аэрогамма-спектрометров АГС-4К, ведущих непосредственно в полете кодирование информации на перфоленту в формате серийных универсальных ЭВМ. Этот этап знаменовал собой известную завершенность технических разработок в аэрогамма-спектрометрическом

приборостроении и начало развития метода на базе создания алгоритмов и программ обработки данных АГСМ – съемок с целью унифицированного получения информации, способной эффективно управлять процессом поисков.

В представленном сборнике помещены статьи, в которых приводятся результаты АГСМ – съемок с отечественными кодовыми аэрогамма-спектрометрами АГС-4К и АГС-5К и автоматизированной обработкой данных на ЭВМ Минск-22, Минск-32, М-222 по системе "Аэропоиск-2"; рассмотрена функциональная схема "Аэропоиск-2"; определена целевая функция АГСМ-метода как метода поисков в системе геологических исследований; кратко изложено современное состояние АГСМ – метода за рубежом и приведены результаты испытаний канадского кодового аэрогамма-спектрометра DiGRS-3001.

Кроме того, представлена статья, рассматривающая роль калия при формировании рудных систем.

Первые результаты и выводы должны рассматриваться как предварительные, а не окончательные. В связи с этим мы считаем допустимым наличие спорных положений в некоторых статьях. Одно представляется бесспорным: огромные массивы данных АГСМ-съемок не способны к эффективному управлению без их "сокращения", реализуемого путем разделения сигналов в системе "аномалия – фон" с помощью универсальных ЭВМ. Требование не ново. Оно диктуется всем ходом НТР.

Мы надеемся, что сборник привлечет внимание геологов и геофизиков к проблемам и возможностям кодовой аэрогамма-спектрометрии, и это послужит стимулом для ее развития.

ЦЕЛЕВАЯ ФУНКЦИЯ АЭРОГАММА-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКОГО (АГСМ) МЕТОДА В СИСТЕМЕ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Широкое внедрение АГСМ — метода в течение последних 10 лет в практику поисков рудных месторождений породило многочисленные иллюзии и разочарования среди геологов-поисковиков. С одной стороны, примеры высокой эффективности при индикации рудных полей, с другой — нулевой эффект или, в лучшем случае, тривиальный результат. С одной стороны — кажущаяся возможность экспрессного радиогеохимического картирования пород, с другой — принципиальная недостижимость тождества между результатами аэрогамма-спектрометрических и радиогеохимических измерений.

Не вдаваясь в детальный анализ отмеченной двойственности, укажем только, что одной из основных ее причин является, с нашей точки зрения, известное несоответствие между возможностями метода и теми целями, которые перед ним ставились и ставятся. Такому положению во многом способствовали многочисленные отечественные и зарубежные публикации, в которых примеры успешного применения метода выдвигались за закономерный результат. В то же время, отрицательные результаты оставались, как правило, компетенцией авторов исследований. Вполне естественное стремление получить положительный результат в каждом конкретном случае привело к подмене единой целевой установки в АГСМ — методе многочисленными частными целями, для достижения которых создавались аппаратные и методические паллиативы, далекие от сколько-нибудь широкого применения. Такая подмена затруднила выбор наилучших решений, повышающих эффективность метода в целом, затруднила управление развитием метода в соответствии с его целевой функцией, когда цель задается не точкой в про-

странстве значений переменных, а некоторым направлением движения.

Важность проблемы формирования цели для любого метода исследований не вызывает сомнений: неправильное или неточное ее определение может сделать любую хорошо разработанную систему неэффективной. В то же время проблема цели неразрывно связана с проблемой эффективности или степенью достижения цели, которую необходимо количественно оценивать.

В настоящей статье мы рассмотрим ряд вопросов, связанных с определением целевой функции АГСМ – метода, рациональными путями ее достижения и проблемой определения эффективности метода с точки зрения надежности и достоверности получаемой информации. Мы будем рассматривать эти вопросы на основе представления об АГСМ – методе, как об аэрогеохимическом методе поисков геохимически аномальных радиоактивных объектов, изучающем пространственные вариации интенсивностей трех составляющих /"тория", "урана", "калия"/ спектра поля радиоактивного излучения, которые возникают в приземной части атмосферы в результате:

- а/ вариаций содержаний радиоэлементов в поверхностном слое земной поверхности толщиной 30–50 см;
- б/ переменных геометрических условий измерений;
- в/ переменной радиоактивности атмосферного воздуха.

Одним из наиболее естественных подходов к выбору целевой функции для АГСМ – метода, как метода поисков, является снижение неопределенности результата интерпретации. В геохимических поисках такой подход реализуется рациональным упорядочиванием совокупности наблюдений путем их разделения на два класса: АНОМАЛИЯ и ФОН. Под фоном подразумевается любое распределение, к которому принадлежит большинство проб, отобранных по площади исследования случайным образом; под аномалией – любое распределение, отличное от фона. Аналогично целевой функцией аэрогеохимического метода должно быть РАЗДЕЛЕНИЕ зарегистрированных вариаций поля на фоновые и аномальные. В АГСМ – методе этим понятиям соответствуют фоновые вариации составляющих поля радиоактивного излучения и аномальные вариации, устойчиво связанные с локальными или региональными геохимически аномальными радиоактивными системами, су-

дествующими на поверхности Земли. Известно, что ряд месторождений нерадиоактивных /и всех радиоактивных/ руд, а точнее поля околорудных изменений, могут в той или иной степени ассоциировать с локальными геохимически аномальными радиоактивными системами, которые сами по себе не тождественны геохимически аномальным рудным системам – рудопрооявлениям нерадиоактивных руд. Вопрос их связи и соответствий /имеющий статистический характер/ решается отдельно, в каждом конкретном случае, на уровне конкретных геологических данных, и не имеет прямого отношения к целевой функции АГ'СМ – метода.

1. Коррелируемость, малая вероятность, доминантность – три признака аномальности

Геохимическая аномалия есть явление, нетипичное для геохимического фона, противостоящее ему по ряду признаков, которые естественно назвать аномальными. С нашей точки зрения вид функции, выбираемой в качестве интенсивной характеристики этих признаков, должен удовлетворять, во-первых, так называемому вариационному принципу, в соответствии с которым для данного класса явлений /аномалий поля/ функция экстремальна /максимальна или минимальна/ и измерима. Во-вторых, функция должна быть инвариантной, независимой от условий измерений, и, в-третьих, формализуемой для стандартного использования в автоматизированных системах.

Частично этим условиям удовлетворяют широко применяемые в АГ'СМ – исследованиях многочисленные "индикаторные" отношения: Th/U , K_2O/Th , U/K , $Th+U/K$ и т.п. Однако большая дисперсия дроби, довольно легкое обращение её в бесконечность /или в нуль/ при случайном обращении в нуль знаменателя или числителя /что характерно, например, при измерении поля слабой интенсивности/ существенно ограничивает ее применение.

Принцип выбора аномальных признаков в наиболее общей постановке вопроса рассмотрим на примере формирования геохимического спектра в пределах рудных месторождений как аномалии относительно безрудного фона. Геохимический спектр – это совокупность рудных элементов, присутствующих в рудах месторождения, каждый из которых характеризуется своим коэффици-

ентом концентрации /отношением содержания элемента к его кларку/ и широтой представительства в месторождениях данной формации. Рассмотрение различных геохимических спектров позволяет сделать вывод, что универсальным аномальным признаком является коррелированное накопление до высоких концентраций /маловероятных для фона/ ведущих рудных элементов и возникающий в результате этого антагонизм между ведущими и остальными рудными элементами, которые либо выносятся, либо остаются в пределах их стандартов на исходном фоновом уровне /частным случаем которого может быть кларк/.

При АГСМ - исследованиях мы имеем дело с интенсивностями трех составляющих спектра поля радиоактивного излучения - тория, урана, калия. Соответственно аномалия, в общем случае, должна возникать как коррелированное изменение интенсивностей по крайней мере двух составляющих относительно фоновой совокупности их взаимнонезависимых значений. Именно этот процесс стимулирует появление "нетипичной", аномальной ситуации, маловероятной для фона.

Используя понятие энтропии объединенного множества $/X, Y/$, легко показать, как появление связи, коррелируемости, между двумя исходами множеств X и Y , снижает неопределенность ситуации по сравнению с неопределенностью при независимых исходах - $H /X, Y/$:

$$H /X, Y/ = H /X/ + H /Y/ \geq H /X/ + H /Y/X/, \text{ то есть } H /Y/ \geq H /Y/X/, \text{ где}$$

$H /X/$ и $H /Y/$ - безусловные энтропии исходных множеств;

$H /Y/X/$ - величина условной энтропии, характеризующая корреляцию Y и X .

Очевидно, что если результаты измерений независимы, $H /Y/$ остается постоянной; при появлении зависимости она уменьшается. В качестве меры, пропорциональной возникающей разности энтропий, можно использовать количество условной информации:

$$J(Y/X) = \log_2 \frac{1}{\sqrt{1 - r^2_{XY}}}, \text{ где } /1/$$

r_{XY} - выборочный коэффициент корреляции между X и Y ;

X и Y - значения интенсивностей составляющих поля в некотором "окне" наблюдения, ортогонализированные в соответ-

ствии с ковариационной матрицей фоновой выборки
обоих множеств.

Данный вид функции вполне пригоден в качестве признака аномальности, по которому выборка с наличием связи между X и Y /максимум χ^2 / противопоставляется фону, в котором $\chi_{xy} = 0$ по условию. Функция χ^2 измерима во всем диапазоне изменений χ_{xy} /кроме единственного, практически не реализуемого на практике значения 1/ и не требует для своего применения каких-либо искусственных ограничений. Однако можно допустить существование аномальной ситуации в отсутствии коррелируемости между ортогонализированными составляющими. Это относится к случаю так называемых "моноэлементных" аномалий.

В качестве признака аномальности может выступать также традиционный признак малой вероятности принадлежности данного сочетания интенсивностей составляющих поля к фоновой выборке. Этот признак широко используется во всевозможных поисковых системах. В соответствии с ним результаты исследований некоторого фонового поля по N -параметрам целесообразно представлять в виде точек N -мерного пространства, ортонормированным базисом которого являются N -векторов /по числу параметров поля/. В случае АГСМ - исследований задача сводится к нахождению в каждой точке исследуемого поля трехмерной вероятности:

$$P(\rho) = \frac{1}{(2\pi)^{3/2}} \iiint_{\rho^2 \leq B^2} \exp\left(-\frac{\rho^2}{2}\right) dx dy dz, \text{ где } /2/$$

$$\rho^2 = \left(\frac{x - \bar{x}}{\sigma_x}\right)^2 + \left(\frac{y - \bar{y}}{\sigma_y}\right)^2 + \left(\frac{z - \bar{z}}{\sigma_z}\right)^2$$

X, Y, Z -линейные комбинации тория, урана, калия, в которые преобразованы измеренные интенсивности составляющих поля.

$\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$ -их средние значения в фоне.

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ -стандарты X, Y, Z в фоне.

На рис. I проиллюстрировано смысловое значение $P(\rho)$ и ρ .

Из рисунка видно, что чем больше P/ρ /и, соответственно, меньше ρ , тем дальше результат измерения находится от фона и, соответственно, ближе к аномалии.

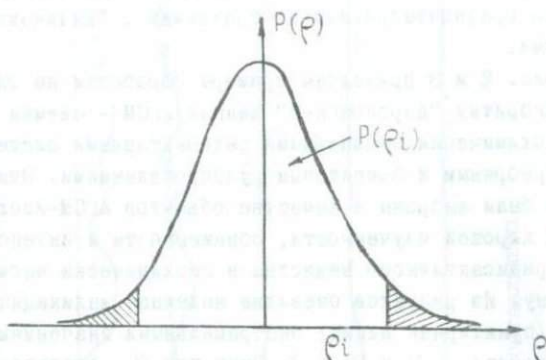


Рис.1. График нормальной функции

Третий признак аномальности — доминантность. Этот признак является смысловым, специфическим признаком. Он характеризует быстроту возрастания в аномалии интенсивности какой-либо составляющей поля по сравнению с другой. Доминантность определяет главную составляющую, ответственную за аномальный эффект и, в известном смысле, связана с нарушением типовых корреляционных связей, характерных для фона. Функция доминантности может иметь вид:

$$D(x_i, y_i) = \left| \frac{a_i - \bar{a}}{\sigma_a} - \frac{b_i - \bar{b}}{\sigma_b} \right| e^{\frac{1 - [(a_i) \div (b_i)]}{2}}, \text{ где } 1/3/$$

$(a_i) = \frac{a_i - \bar{a}}{\sigma_a}$ — нормализованное отклонение интенсивности a — той составляющей поля от среднего значения интенсивности этой составляющей в фоне — $\bar{a}$.

$(b_i) = \frac{b_i - \bar{b}}{\sigma_b}$ — нормализованное отклонение интенсивности b — той составляющей поля от среднего значения $\bar{b}$.

$[(a_i) \div (b_i)]$ — в скобку заносится меньшее из двух значений

σ_a, σ_b — стандарты составляющих в фоновой выборке.

Ограничительное условие применимости (3) : либо $|a_i|$, либо $|b_i|$ / должно быть больше 1.

Подбор соответствующих индикаторов $|a_i|$ и $|b_i|$ / обеспечивает для функции доминантности выполнение вариационного

принципа при любых значениях $/a_i/$ и $/b_i/$, что делает его применение предпочтительным по сравнению с "индикаторными" отношениями.

На рис. 2 и 3 приведены примеры обработки на ЭВМ "Минск-32" по алгоритму "Аэропоиск-2" данных АГСМ - съемки над типовыми геохимически аномальными радиоактивными системами с золото-серебряным и бокситовым рудопоявлениями. Эти рудопоявления были выбраны в качестве объектов АГСМ-исследования в силу их хорошей изученности, обнаженности и интенсивного привноса радиоактивного вещества в геохимически аномальную рудную зону. Из рисунков очевидна надежная индикация аномалий поля /пунктирная линия/ экстремальными значениями D /калия и тория/, Σ и P/ρ /. Знак при Σ соответствует знаку коэффициента корреляции в "окне" между ортогонализированными значениями составляющих тория и калия. На рис.3 отмечается также аномалия - экстремумы P/ρ / и D_{Th} , сформированная увеличением интенсивности только одной составляющей - тория.

В ряде случаев может представлять интерес задача поисков аналогий, то есть классификация всех наблюдаемых в пределах площади исследования совокупностей тория, урана, калия по степени удаленности от центра их трехмерного распределения, характерного для некоторой, известной априори, рудной среды. В этом случае множество аномальных трехмерных совокупностей в пределах эталонных рудных площадей образует трехмерное распределение - эталонный "образ", с которым по вероятности P/ρ / в соответствии с ф-лой /2/ можно сравнивать все наблюдаемые в пределах площади исследования совокупности. Чем больше значение P/ρ /, тем, соответственно, меньше "сходство" результата наблюдения с "образом".

2. Фоновый уровень и полевые системы

Из уравнений 1, 2, 3 видно, что изучение фонового поля, предваряющее поиск аномалий поля, производится с целью определения:

- а/ псверхности отсчета отклонений;
- б/ дисперсий составляющих поля;
- в/ парных коэффициентов корреляций между составляющими.

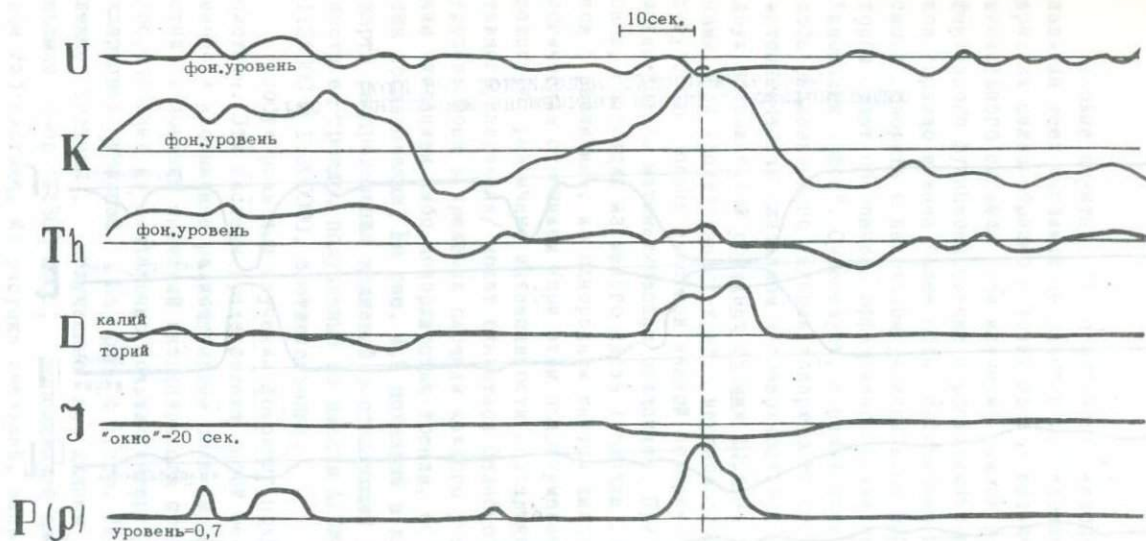


Рис.2.Индикация аномальных вариаций составляющих поля над золото-серебряным объектом.

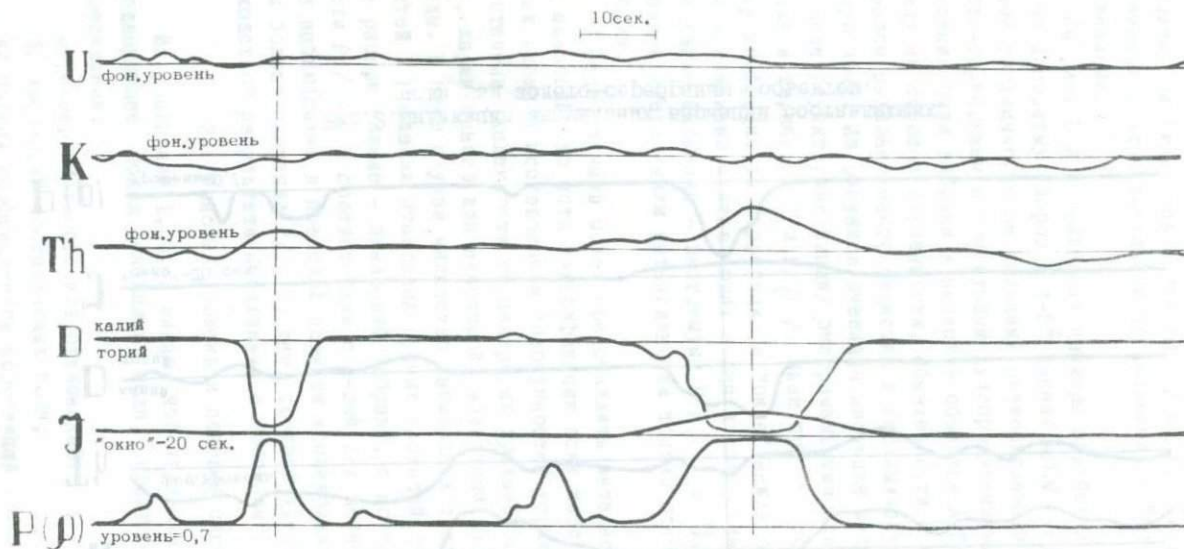


Рис.3 Индикация аномальных вариаций составляющих поля над бокситовым рудопроявлением.

Вполне понятно, что практически невозможно формализовать задание всех мыслимых на участке исследования фонов. Да это вряд ли целесообразно с точки зрения надежности выявления аномального сигнала /или минимума ошибок 2-го рода/. Для эффективного функционирования аэрогеохимического метода поисков гораздо важнее более общая постановка задачи. Имеет смысл говорить о некотором рациональном выборе фона, при котором будет обеспечено эффективное разделение в системе "аномалия - фон". Существуют, с нашей точки зрения, два способа рационального задания поверхности отсчета отклонений: математическим ожиданием и поверхностью тренда. Каждая из двух возможностей обладает своими достоинствами и недостатками. При исследованиях крайне неоднородных или, напротив, сугубо однородных участков земной поверхности уровень фона можно задать математическим ожиданием. При исследовании районов, состоящих из малого числа /порядка 2-3/ крупных участков с различным, но однородным внутри каждого участка геологическим строением /при этом подразумевается, что им соответствуют различные интенсивности составляющих поля радиоактивного излучения/ может оказаться целесообразным задавать уровень фона в пределах площади каждого участка математическим ожиданием либо поверхностью тренда, общей для всего района исследования. На рис. 4,5 показаны в качестве примеров карты распределения калиевой составляющей спектра и поверхности ее тренда, полученные по данным АГСМ-съемок м-ба I:25000 и I:200000, соответственно.

Особую роль при изучении фонового поля играют полевые системы. Эти системы представляют собой региональные геохимически аномальные радиоактивные поля характерных совокупностей отклонений значений интенсивности составляющих поля /осредненных на достаточно больших интервалах/ от их кларковых уровней. На рис. 4 (стр. 72) показаны полевые системы, полученные по данным фоновой АГСМ-съемки м-ба I:500 000, выполненной автором в Восточном Узбекистане. Из рисунка очевидна, например, связь площади, включающей золото-серебряные рудопроявления, с характерной полевой системой: "надкларковый калий-докларковый торий"^{x/}
^{x/} Те же системы могут выделяться и использованием функции доминантности $\bar{Z}$ /стр. II/, в которой σ_i , $\bar{\alpha}_i$, α_i , $\bar{\beta}_i$ и β_i выражены в единицах кларка.

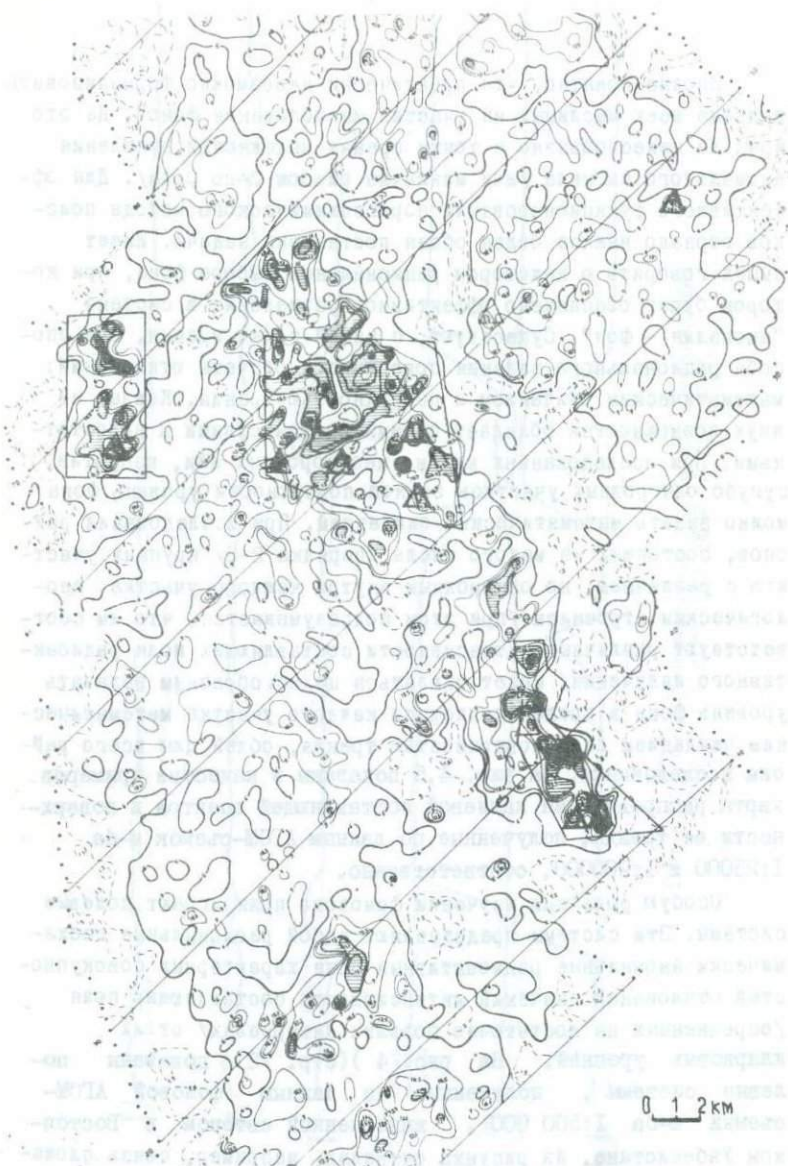


Рис.4. Карта распределения К-составляющей
(м-ба съемки 1:25000).

1654

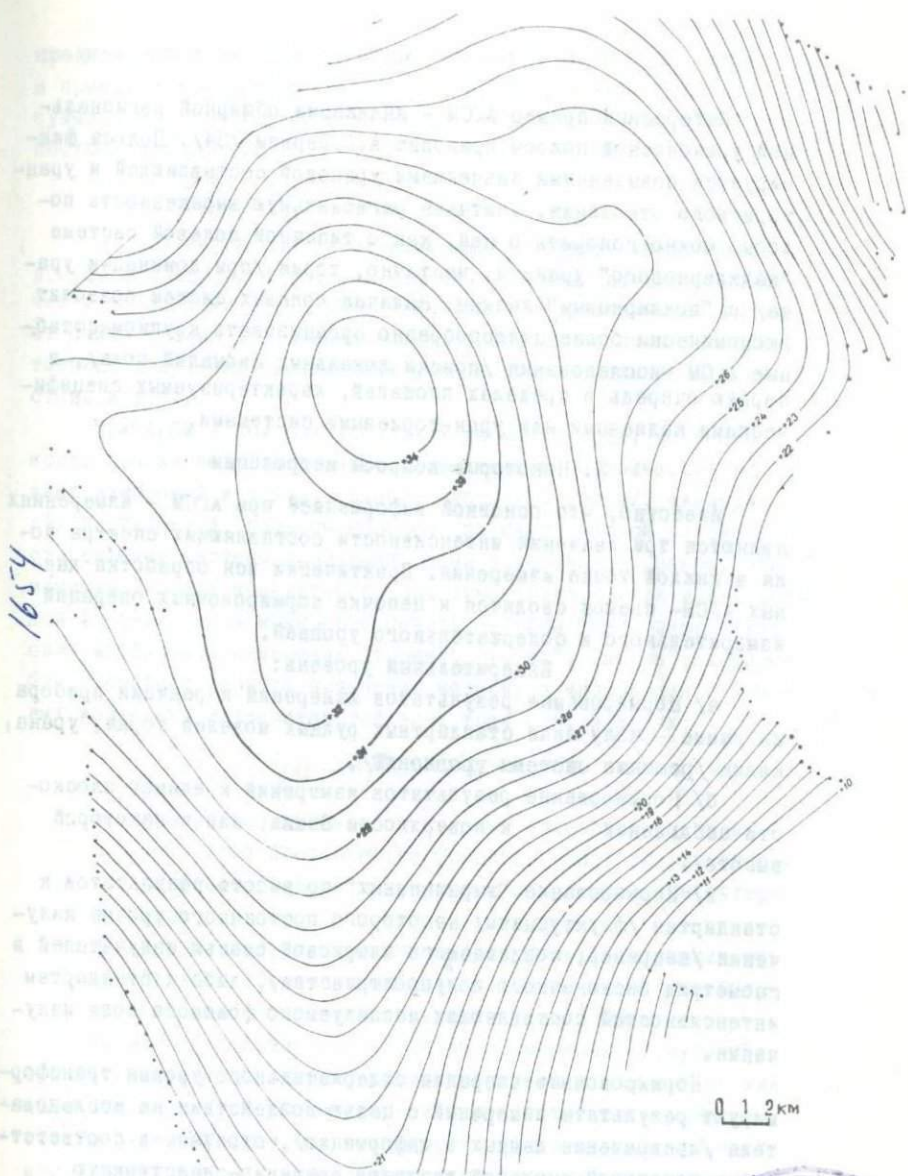


Рис.5. Поверхность тренда К-составляющей
(м-ба съемки 1:200 000).



Интересный пример АГСМ - индикации обширной региональной ураноносной полосы приводит А.Г.Дарнли /34/. Полоса фиксируется повышенными значениями урановой составляющей и уран-ториевого отношения. Учитывая региональную выраженность полосы, можно говорить о ней, как о типичной полевой системе "надкларкового" урана и, частично, тория /при доминании урана/ с "докларковым" калием. Наличие полевых систем позволит экономически более целесообразно организовать крупномасштабные АГСМ - исследования /поиски локальных аномалий поля/, в первую очередь в пределах площадей, характеризующихся специфическими калиевыми или уран-ториевыми системами.

3. Некоторые вопросы метрологии

Известно, что основной информацией при АГСМ - измерениях являются три значения интенсивности составляющих спектра поля в каждой точке измерения. Практически вся обработка данных АГСМ- съемок сводится к цепочке нормировочных операций измерительного и содержательного уровней.

Измерительный уровень:

а/ Нормирование результатов измерений к реакции прибора на гамма - излучение стандартных рудных моделей тория, урана, калия /решение системы уравнений/.

б/ Нормирование результатов измерений к единой плоскости наблюдений к поверхности Земли, или к некоторой высоте/.

в/ Нормирование "выравненных" по высоте результатов к стандартам /флуктуациям/ некоторого постоянного уровня излучения /например, создаваемого кларковой смесью излучателей в геометрии бесконечного полупространства/, либо к стандартам интенсивностей составляющих исследуемого фонового поля излучения.

Нормировочные операции содержательного уровня трансформируют результаты измерений с целью воздействия на исследователя /превращение данных в информацию/, отражая в соответствии с некоторой системой взглядов причинно-следственную связь явлений. К таким операциям относятся вычисления трех указанных выше аномальных признаков.

Существует известная сложность оценки метрологических параметров аэрогамма-спектрометра как измерительного прибора,

предназначенного для поисков аномалий поля в фоне. В принципе измерительные качества прибора можно оценивать суммарной погрешностью отдельного отсчета при измерении поля постоянного уровня:

$$\delta^2 = \delta_u^2 + \delta_{Th}^2 + \delta_K^2 \quad /4/$$

но при такой оценке минимум ошибки будет достигаться всегда в приборах с большим рабочим объемом датчиков, практически независимо от их энергетического разрешения. А это имеет смысл только при исследованиях однородного поля радиоактивного излучения протяженных ровных пространств /почв, пустынь и т.п./

При АГСМ — поисках локальных аномалий поля, особенно, когда поиски ведутся в резко переменных геометрических условиях измерений и с малых высот полета /до 100 м/, минимум /4/ достигается, главным образом, за счет высокой устойчивости решения системы уравнений. Нами показывалось ранее, что минимум /4/ для конкретного аэрогамма-спектрометра и конкретной фоновой среды можно обеспечить выбором таких энергетических интервалов измерения "тория", "урана", "калия", которые будут соответствовать получению максимума информации о фоновых вариациях интенсивностей всех трех составляющих:

$$\gamma_i = \frac{1}{2} \log_2 \frac{a+b}{b} \quad , \text{ где} \quad /5/$$

a — среднеквадратичное отклонение полезного сигнала / i — той составляющей фонового поля/ при измерениях фонового поля в некотором энергетическом интервале;

b — среднеквадратичное отклонение помехи /вариации остальных составляющих поля в том же интервале энергий плюс статистические флуктуации/.

Несмотря на известные удобства применения формулы /5/, она не отвечает на вопрос, удовлетворительно или нет то или иное значение γ . Ответ, по-видимому может быть получен только путем установления некоторого стандарта для конкретного полигона с разнообразными радиоактивными характеристиками пород, в пределах которого каждый поисковый прибор необходимо стандартизовать.

Практика АГСМ исследований показывает, что стандарт помехи при измерении той или иной составляющей можно приближенно записать выражением:

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma_{\phi i}^2 + \sigma_{ci}^2}, \text{ где } \quad /6/$$

$\sigma_{\phi i}$ — стандарт математического ожидания i -той составляющей поля фоновой выборки.

σ_{ci} — стандарт i -той составляющей поля в фоновой выборке.

Не требует доказательств утверждение, что при низкополетной АГСМ-съемке и переменных геометрических условиях измерений почти всегда $\sigma_c > \sigma_{\phi}$, а $\sigma_c^2 \gg \sigma_{\phi}^2$. В этом случае отношение сигнал/помеха сводится практически к отношению $\Delta N_i : \sigma_{ci}$, где ΔN_i — значение интенсивности аномальной i -той составляющей поля над фоновым уровнем. Отсюда следует, что увеличение сверх некоторой величины объема датчика аэрогамма-спектрометра с целью повышения точности измерений /снижения относительной среднеквадратичной погрешности математического ожидания фона — $\sigma_{\phi i}$ / не всегда будет способствовать улучшению поисков аномалий, поскольку σ_{ci} возрастает почти коррелированно с ΔN_i при увеличении объема датчиков. Отечественными и зарубежными исследованиями показывается, что поиски локальных аномалий поля при низкополетных АГСМ-съемках и переменных геометрических условиях измерений, при большой дисперсии составляющих поля могут эффективно осуществляться уже при объеме датчиков 4–5 тыс. см³ и энергетическом разрешении не хуже 15–18% по Cs I³⁷.

На рис. 6-II показан результат обработки по алгоритму "Аэропоиск-2" данных АГСМ-съемки, выполненной автором над геохимически аномальной радиоактивной зоной с золото-серебряным оруденением в вулканиках Охотско-Чукотского вулканогенного пояса. Съемка выполнялась с кодовым аэрогамма-спектрометром АГС-4к /датчик — I кристалл NaJ(Tl) 200 x 150 мм; объем — 4700 см³/, с высот 50 м и 120 м.

Из рисунков очевидна отчетливая выраженность аномалии по аномальному признаку — доминанте калия. Характерно, что для фонового поля радиоактивного излучения данного района

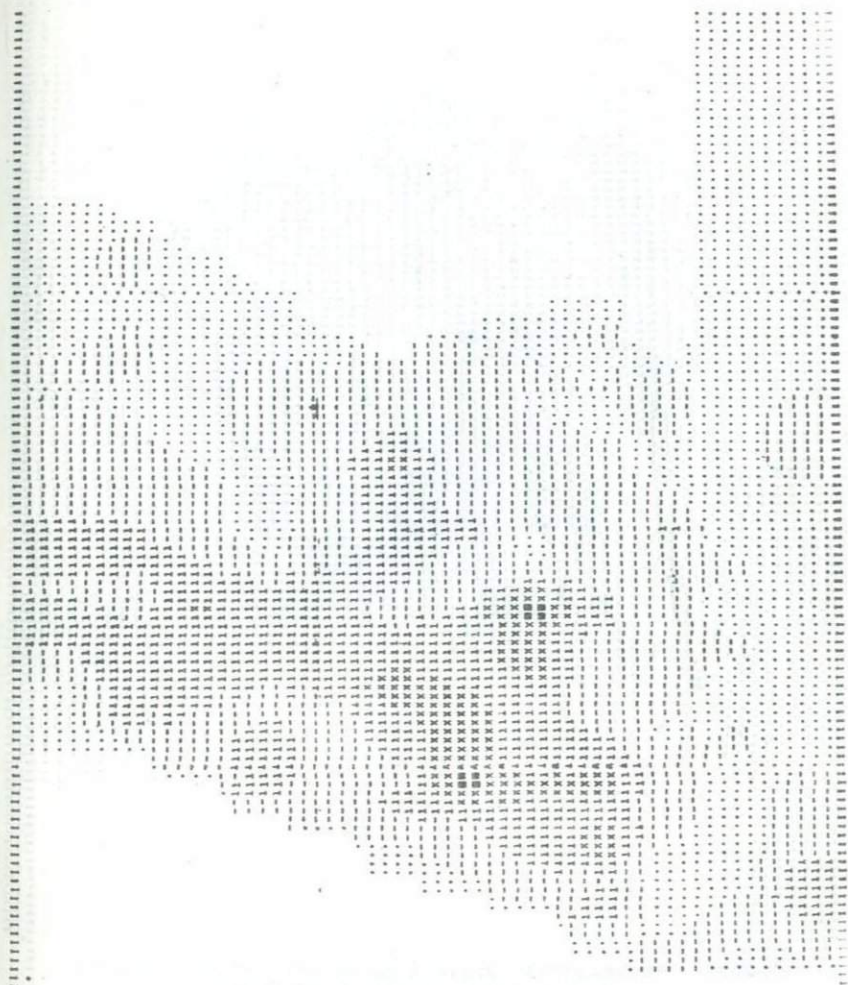


Рис.6. Распечатка на АЦПУ карты распределения "тория" юго-западного фланга рудного поля.
М-ба 1:25000. Высота полета/н / = 50-70 м.

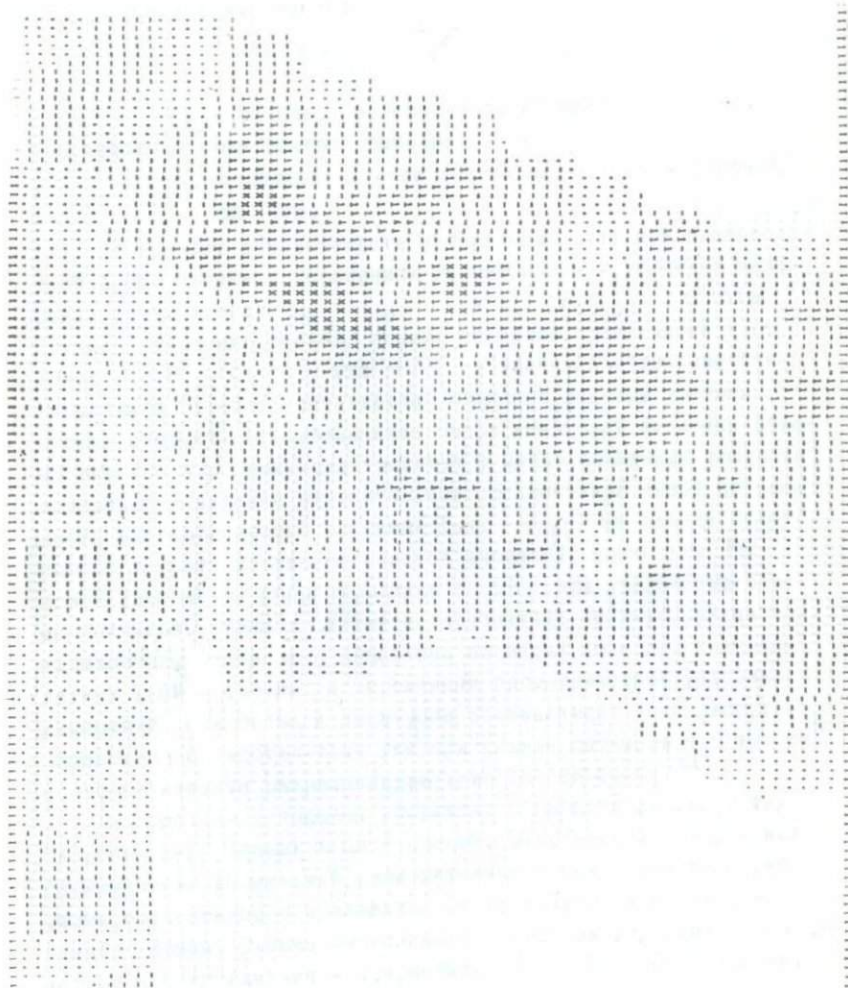


Рис.7. Распечатка на АЦПУ карты распределения "тория"
юго-западного фланга рудного поля.
М-6 I:25 000. $h > 120$ м.

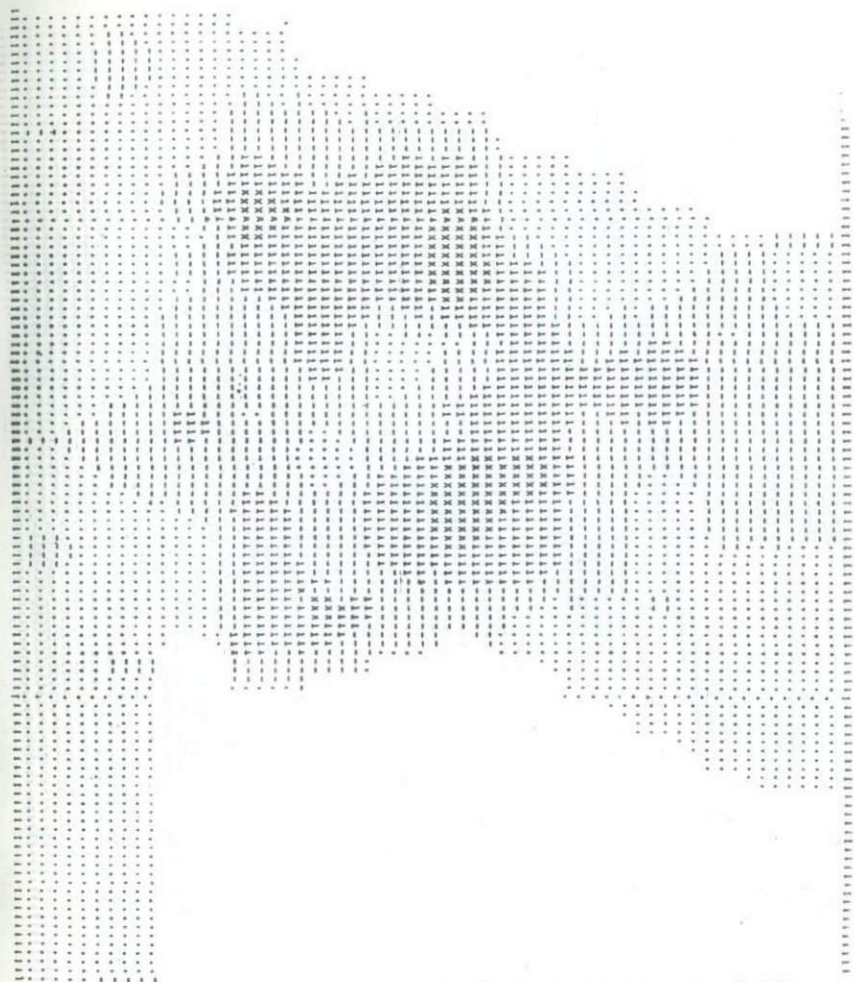


Рис. 8. Распечатка на АЦПУ карты распределения "калия"
юго-западного фланга рудного поля.
М-б 1:25.000. $\eta = 50 - 70 \text{ м.}$

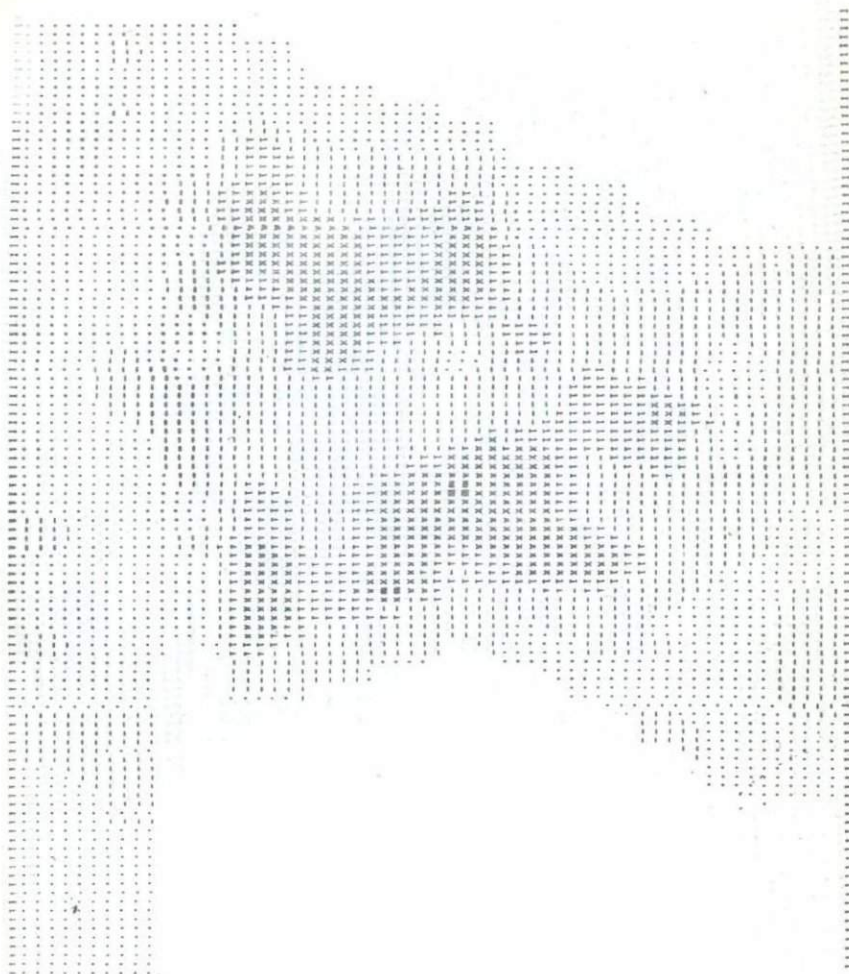


Рис.9. Распечатка на АЦПУ карты распределения "калия"
юго-западного фланга рудного поля.
М-б 1:25.000. $h > 120$ м.

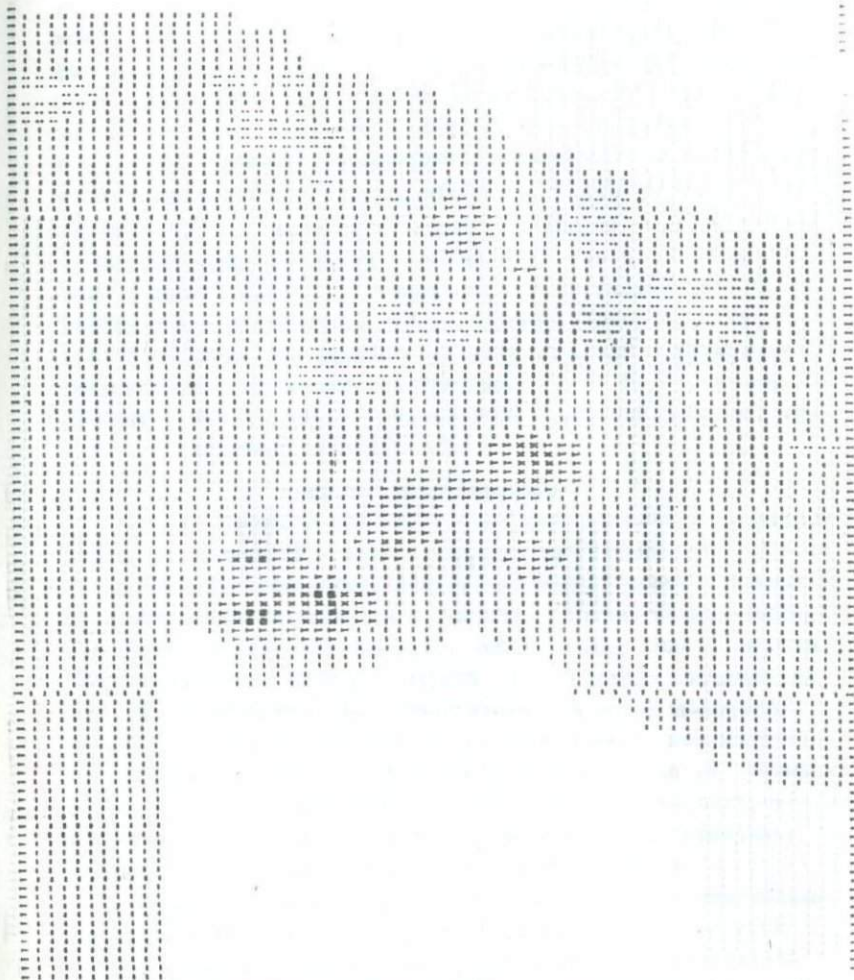


Рис.10. Распечатка на АЦПУ карты распределения Π_K вго-
западного фланга рудного поля.
М-6 1:25.000. $n = 50 - 70$ м.

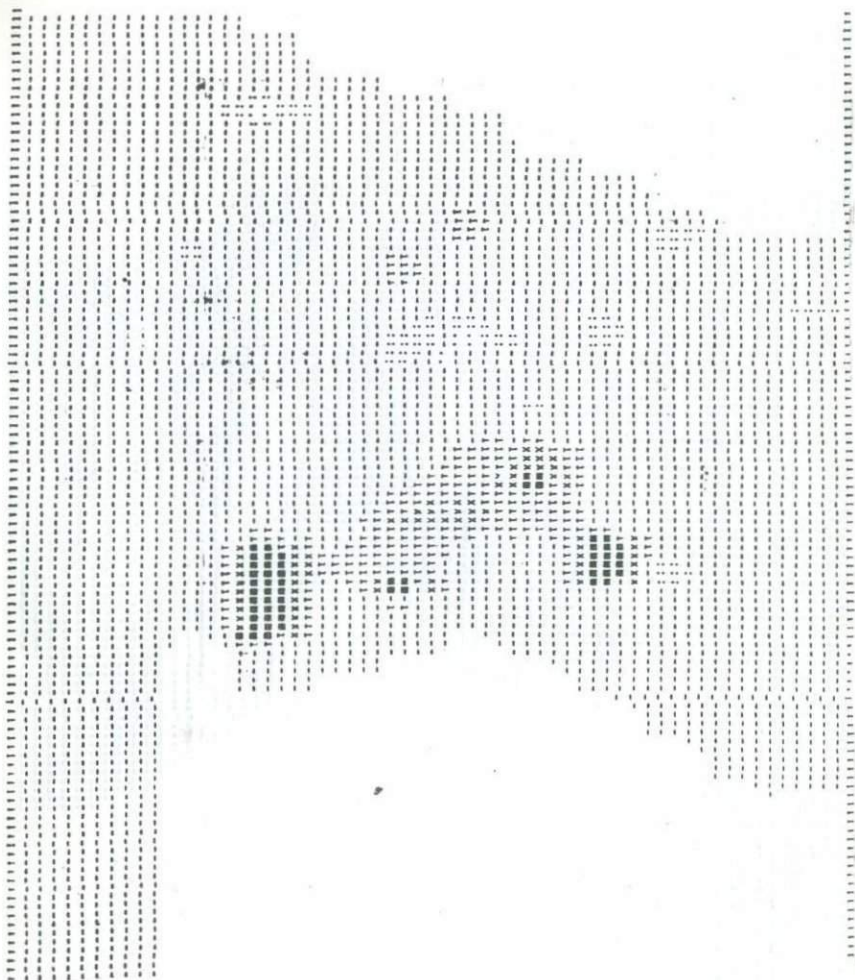


Рис. II. Распечатка на АЦПУ карты распределения D_K юго-западного фланга Γ рудного поля.
М-б 1:25.000. $n > 120$.

σ_c калия $\approx 2,5 \sigma_{\phi}$ калия /19 имп/сек и 8 имп/сек соответственно/. Из рисунков также следует, что аномальный признак - доминанта калия - на высоте 120 м становится даже несколько более резко выраженным, чем на высоте 50 м. Это связано в первую очередь с тем, что в данном случае отношение $\Delta N / \sigma_c$ в аномалии калиевой составляющей на высоте 120 м увеличивается за счет более быстрого уменьшения с высотой σ_c по сравнению с ΔN . Разумеется, данный пример не имеет отношения к индикации узлокальных аномалий и уж тем более из него нельзя делать вывод, что отношение сигнал /помеха всегда улучшается с увеличением высоты. Пример только показывает, что эффективные поиски аномалий поля возможны с датчиками сравнительно небольших объемов, если $\sigma_c^2 \gg \sigma_{\phi}^2$, и даже с больших высот, когда σ_c уменьшается с высотой быстрее, чем ΔN /естественно, при $\Delta N > 0$ /.

4. Критерий эффективности

Мы уже отмечали необходимость уметь оценивать на каждом этапе развития АГСМ - метода степень достижения цели. Исходя из целевой функции метода его эффективность может оцениваться достоверностью разделения "смеси": геохимически аномальная радиоактивная система - фоновые вариации поля. При этом подразумевается наличие первой на площади исследования и возможность ее обнаружения аэрогамма-спектрометром. На рис. 12 показана схема функционирования идеального разделителя. Под разделителем в данном случае мы понимаем совокупность измерительного прибора - аэрогамма-спектрометра и системы обработки результатов измерений, вырабатывающей аномальные признаки, влияющие на наземные поиски.

Функционирование разделителя обеспечивается необходимыми затратами L /в рублях/, включающими затраты на АГСМ - съемку и наземные проверочные работы. На вход разделителя поступает поток m_0 /заданная площадь исследования/, в котором "смешаны" X_0^1 /часть площади, занимаемая известными геохимически аномальными радиоактивными системами/ и $X_0^2 = 1 - X_0^1$ /остальная часть площади - фоновая среда/. На выходе разделителя образуются два потока:

m_1 - аномалии поля, где X_1^1 - часть аномального "по-



Рис. 12. Функциональная схема разделителя.

тока" m_1 , совпадающая с геохимически аномальными радиоактивными системами - X_0^1 , и $X_1^2 = 1 - X_1^1$ - остальная часть "потока" m_1 .

m_2 - фоновый "поток", где X_2^1 - та его часть, которая совпадает с аномалиями, а $X_2^2 = 1 - X_2^1$ - остальная часть "потока" m_2 .

Для оценки разделительного потенциала системы $-\Phi(X)$ воспользуемся математическим аппаратом, разработанным Дираком и Коэном специально для этих целей /10/:

$$\Phi(X) = (2X-1) \ln \frac{X}{1-X} \quad /7/$$

С помощью разделительного потенциала можно оценить разделительную мощность системы - N :

$$N = m_1 \cdot \Phi(X_1^1) + m_2 \cdot \Phi(X_2^1) - m_0 \cdot \Phi(X_0^1)$$

Эффективность системы разделения оценивается стоимостью единицы разделительной мощности: $L \cdot N$.

Большой эффективности будет соответствовать меньшая стоимость при некоторых ограничениях. Ограничения задаются необходимостью получения целесообразного и приемлемого результата. Оценка эффективности той или иной разделительной системы будет тем ближе к истинной, чем больше поток m_0 и меньше X_0^1 .

Сравнение эффективности различных систем разделения целесообразно производить на эталонных полигонах с известными распределениями аномальных и фоновых участков.

Заключение

Рассмотренные вопросы позволяют в известной мере связать воедино целевую функцию АГСМ — метода при геологических исследованиях: разделение в системе "аномалия — фон", рациональные пути её достижения и критерий эффективности. Мы пытались осветить эти аспекты, используя формальный аппарат описания, что, с нашей точки зрения, представляется необходимым, если ориентироваться на их применение в автоматизированных системах управления и обработки. Подобный подход позволяет исключить, по возможности, субъективизм при выявлении аномалий поля и сделать объективной оценку эффективности той или иной разделительной системы на базе стандартизации измерительного и содержательного уровней АГСМ — исследования.

*Э. Я. Островский, В. С. Блашинский,
Ф. М. Персиц, Д. В. Калмыков,
В. М. Пономарев, Е. С. Горелик*

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ АЭРОГАММА-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИХ СЪЕМОК - "АЭРОПОИСК-2"

В настоящее время проблема повышения эффективности геофизических исследований при решении поисковых задач не может быть решена на основе совершенствования только технических средств и способов измерений. Ограниченные возможности традиционной логики обработки и интерпретации результатов геофизических измерений на базе аналоговых систем регистрации существенно снижают эффективность геофизических съемок в смысле надежности и достоверности разделения сигнала и помехи на измерительном уровне и на уровне выявления аномалий.

Эффективное использование АГСМ - метода и дальнейшее его усовершенствование невозможно без применения автоматизированных систем обработки данных на универсальных ЭВМ для решения главной задачи: унифицированной обработки больших массивов информации на базе реализации сложных вычислительных процедур при многократной и однозначной воспроизводимости результатов обработки.

Создание таких систем было начато одновременно с разработкой и изготовлением первых кодовых аэрогамма-спектрометров АГС-4к, обеспечивающих непосредственный ввод в ЭВМ всех измеряемых в процессе съемки параметров. Результатом явилось создание алгоритма "Аэропоиск-1" /16/, а затем "Аэропоиск-2", реализованного на ЭВМ "Минск-22/32" /14/.

С 1974 г. разрабатывается автоматизированная система обработки данных комплексных аэрогеофизических съемок /АГСМ, магнитной, электроразведочной/ под условным названием "АСОМ-Аэрогеофизика". В этой системе "Аэропоиск-2" используется в качестве тракта обработки АГСМ - информации, получаемой как с автономных, так и с комплексных носителей информации /на-пример, носителя станции фирмы "Макфар"/.

Универсальность системы обработки достигается включением в нее вводной и редактирующей программ, позволяющих учитывать специфику кодирования данных.

Вся информация, получаемая в процессе съемки, состоит из массивов двух типов: "блок настройки" и "блок основной информации". Массив "блок настройки" - последовательность подмассивов измерительной информации - включает: значения остаточного фона в трех дифференциальных каналах /ДК/, реакцию трех ДК на гамма-излучение рудных моделей тория / N_{Th}^{PM} /, урана / N_U^{PM} / и калия / N_K^{PM} /, калибровку шкалы радиовысотомера.

Массивы "блока основной информации" состоят из результатов измерений вдоль съемочного маршрута интенсивности гамма-излучения в трех ДК и относительной высоты полета. На перфоленте "блоки настройки" отличаются от "блоков основной информации" только кодом в определенных строках кадра информации. Каждый массив /блок/ содержит информацию о дате и времени начала записи, что позволяет организовать в системе автоматизированный поиск нужной информации. Блок - схема "Аэропоиск-2" показана на рис. 1.

Ввод перфоленты в ЭВМ осуществляется программой "Ввод" /I/. Информация считывается с перфоленты и записывается без изменений в зоны рабочей магнитной ленты. Одновременно на АЦПУ печатаются протоколы с характеристикой закодированных данных.

Подготовка информации для последующей обработки производится системной программой "Раскодировка, контроль и редакция" /2/, в которую входит:

1. Распаковка информации.
2. Контроль формата.

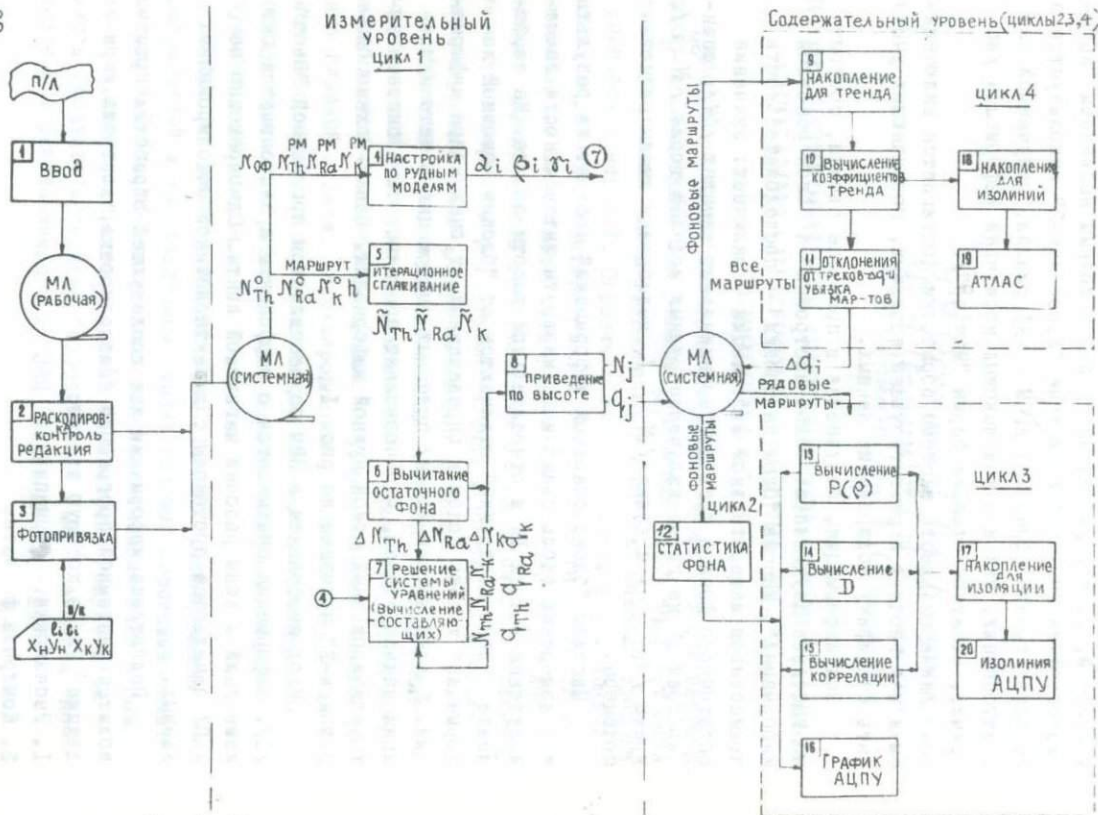


Рис.1. Блок-схема автоматизированной системы "Аэропоиск-2".

3. Контроль четности каждой строки.
4. Раскодировка кадров по таблице.
5. Контроль и интерполяция значений измеренных величин.
6. Составление матрицы реакций ДК на гамма-излучение рудных моделей.
7. Запись упакованной информации на системную МЛ /магнитную ленту/.

В процессе работы программы /2/ печатаются протоколы, в которых указаны число точек /кадров/ на маршруте, число бракованных кадров и причины брака, номера зон системной МЛ. Вся информация на МЛ сведена в "маршруты". Каждый "маршрут" представляет собой несколько зон МЛ, в одну из которых записана упакованная первичная АГСМ - информация на реальном маршруте, две зоны отводятся под результат работы программы "фотопривязка" /3/; остальные зоны могут использоваться для записи конкретных результатов обработки аэромаршрута. Номера "маршрутов" МЛ и аэромаршрутов связаны таблицей соответствия. Эта таблица хранится в программе "Обмен", осуществляющей обмен необходимой информацией между МЛ и МОЗУ. Каждый "маршрут" снабжается "шапкой", в которой записан номер реального маршрута, его длина и дата прохождения.

Данные плановой привязки измерений обрабатываются и используются с помощью программы "фотопривязка" /3/. С перфокарт вводится следующая информация: начальные и конечные координаты маршрута в условной системе координат $X_H; Y_H$ и $X_K; Y_K$ / межориентирные расстояния l_i / и боковые отклонения c_i /, погрешность суммы l_i в конце маршрута ε / и шаг интерполяции Δ /. Алгоритм программы "фотопривязка" выполняет последовательное вычисление координат ориентиров и определение невязки $\varepsilon_{\text{факт.}}$.

Если $|\varepsilon_{\text{факт.}}| \geq |\varepsilon|$, то маршрут пропускается; при $|\varepsilon_{\text{факт.}}| < |\varepsilon|$ невязка разбрасывается пропорционально l_i . Затем выполняется параболическая интерполяция графика скоростей полета между ориентирами, вычисляются уточненные межточечные приращения координат $\Delta X_i; \Delta Y_i$ /.

Выходные результаты программы "фотопривязка" могут представляться в двух видах: а/ межточечные приращения координат

нат ΔX_i , ΔY_i вместе с соответствующими им значениями интенсивности составляющих спектра поля и высоты полета упаковываются в одну ячейку; б/ результаты фотопривязки записываются в две зоны: одна – приращения ΔX_i , ΔY_i , вторая – вычисленные координаты точек измерения X_i , Y_i .

"Аэропоиск-2" включает два уровня преобразования исходной информации: измерительный /цикл I/ и содержательный /циклы 2, 3, 4/. Входными данными цикла I являются обработанные программой /2/ "маршруты", в которых интенсивности составляющих поля N_{Th}^0 , N_{U}^0 , N_K^0 / i / упакованы вместе со значениями измеренных высот в одну ячейку. Здесь i – номер измерения в маршруте длиной n / $i = 1, 2, \dots, n$ /.

Последовательность вычислений следующая:

I. Итерационное сглаживание /5/

В каждой точке в соответствии с /26, 27/ вычисляются сглаженные значения:

$$\begin{aligned}\hat{N}_{Th} &= B \cdot B^T \cdot N_{Th}^0 \\ \hat{N}_U &= B \cdot B^T \cdot N_U^0 \\ \hat{N}_K &= B \cdot B^T \cdot N_K^0\end{aligned}$$

Для системы "АСОМ – Аэрогеофизика" разработан также модернизированный вариант сглаживания, использующий эквивалентные преобразования вычислительных формул итерационного сглаживания, которые позволяют представить итерацию в виде осреднения исходного графика по отрезку из 19 точек с постоянными весовыми коэффициентами /табл. I/.

В этой таблице K_0 – центральный коэффициент, K_I – K_9 – коэффициенты для правой и левой ветвей фильтра. Такая процедура позволяет существенно ускорить сглаживание, полностью сохранив его смысл.

Алгоритмы последующих типовых вычислений: вычитание остаточного фона, решение системы уравнений, приведение измерений к уровню земли аналогичны рассмотренным в /16/ в разделе "Аэропоиск-1".

Основной задачей содержательного уровня обработки является обнаружение среди вариаций интенсивности составляющих поля радиоактивного излучения аномальных вариаций: сигналов – индикаторов геохимически аномальных радиоактивных

таблица I

	Эквивалентные коэффи- циенты	Приближенные коэф- фициенты
K ₀	23,76363	22,375
K ₁	- 15,89032	- 16
K ₂	6,51976	8
K ₃	- 2,55320	- 4
K ₄	0,91898	2
K ₅	- 0,37846	- 1
K ₆	0,13101	0,5
K ₇	- 0,08136	- 0,25
K ₈	0,04203	0,125
K ₉	- 0,04157	-0,0625
Σ	1,08537	1,000

систем, поиски которых определяются в качестве основной цели АГСМ метода поисков. Для этого используются аномальные признаки: малая вероятность, доминантность, коррелируемость /14, 15/.

Содержательный уровень обработки реализуется в трех циклах: "Статистика фона" /цикл 2/, "Обработка рядовых маршрутов" /цикл 3/ и "Тренд - анализ" /цикл 4/.

"Статистика фона" служит для вычисления статистических параметров измеренного поля излучения в пределах площади съемки по маршрутам фоновой съемки /масштаб 1:500000 или 1:200 000/: средних $\bar{q}_{ij}$ /, гистограммы распределений q_{ij} , величины σ_{ij}^F - стандарт математического ожидания фонового уровня, σ_{ij}^Z - стандарт интенсивности составляющей q_{ij} , парные коэффициенты корреляции $\gamma_{Th,u}$, $\gamma_{u,k}$ и $\gamma_{Th,k}$. Кроме этого, в "статистике фона" вычисляется матрица X такая, что $XX^T = E$, где E - единичная матрица, а K - ковариационная матрица вида

$$\begin{vmatrix} \sigma_{Th}^2 & \sigma_{Th} \sigma_u \cdot \gamma_{Th,u} & \sigma_{Th} \sigma_k \cdot \gamma_{Th,k} \\ \sigma_{Th} \sigma_u \cdot \gamma_{Th,u} & \sigma_u^2 & \sigma_u \sigma_k \cdot \gamma_{u,k} \\ \sigma_{Th} \sigma_k \cdot \gamma_{Th,k} & \sigma_u \sigma_k \cdot \gamma_{u,k} & \sigma_k^2 \end{vmatrix}$$

"Аэропоиск-2" предусматривает работу в цикле "Статистика фона" от следующих входных данных:

1. Скоростей счета импульсов в ДК: $(N_{Th})_i, (N_u)_i, (N_K)_i$
2. Интенсивностей составляющих поля - q_{ji}
3. Отклонений Δq_{ji} значений q_{ji} от поверхности тренда.

Реализация "тренд - анализа" для каждой составляющей q_{Th}, q_u, q_K производится комплексом программ /цикл 4/ на основе алгоритма, предложенного И.Д.Савинским /26/. Использование поверхности тренда в качестве фонового уровня отсчета в каждой точке измерения позволяет учесть "региональные", фоновые вариации интенсивностей составляющих q_j . Кроме того, поверхность тренда может использоваться для увязки между собой рядовых маршрутов по площади съемки. Результатом работы комплекса программ цикла 4 являются вычисленные значения отклонений Δq_{ji} для маршрутов съемки и карты изолиний интерполяционной и тренд - поверхностей, вычерченных на устройстве "Атлас". Цикл 3 /обработка рядовых маршрутов/ предназначен для вычисления аномальных признаков: вектора малой вероятности P/ρ , доминанты в системе "торий - калий" - D_{Th}^K , доминанты в системе "уран - торий" - D_u^{Th} и информации J .

1. При вычислении P/ρ предварительно производится ортонормирование вектора - столбца текущих измерений $[q_j]$

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = X \begin{pmatrix} (q_{Th} - q_{Th}^{CP}) \\ (q_u - q_u^{CP}) \\ (q_K - q_K^{CP}) \end{pmatrix}$$

Далее вычисляется модуль вектора трехмерного пространства

$$\rho^2 = x^2 + y^2 + z^2$$

Мера аномальности оценивается величиной критического значения для сферического нормального распределения:

$$P(\rho) = \frac{1}{(2\pi)^{3/2}} \iiint_{\rho^2 \leq B^2} \exp\left(-\frac{\rho^2}{2}\right) dx dy dz$$

2. Вычисление доминанты производится по формуле: $D_n^m = d \cdot e^{\frac{1-x}{2}}$,
 где $d = \left| \frac{q_m - q_m^{CP}}{\sigma_m} - \frac{q_n - q_n^{CP}}{\sigma_n} \right|$

$\epsilon \frac{1-x}{2}$ - эмпирический коэффициент, учитывающий уменьшение доминантности при нарастании антагонистического элемента в аномальном излучении и увеличение её - при ослаблении доли этого элемента,

X - равно меньшей нормализованной разности.

Доминанта вычисляется только в том случае, если хотя бы одно из слагаемых для вычисления d_i больше 1, т.е. отчетливо проявляется увеличение интенсивности одной из составляющих поля.

Для Π_{Th}^K $q_m = q_K$; $q_n = q_{Th}$, а для Π_u^{Th} $q_m = q_u$; $q_n = q_{Th}$

3. Вычисление условной информации $\Upsilon_{X/Y}$ в качестве аномального признака основано на предложенном Э.Я.Островским принципе **максимума связи в n -мерных системах**.

Вычисления ведутся по формуле:

$$\Upsilon = \log_2 \frac{1}{\sqrt{\Delta}}, \text{ где}$$

Δ - определитель корреляционной матрицы ранга n /по числу параметров поля/.

Информация Υ может вычисляться при любых входных данных, используемых для вычисления "Статистики фона", в окне шириной $/2k + 1/$ точек. Для двумерного вектора, составляющими которого являются, например, q_{Th} и q_K ход вычислений следующий:

а/ ортонормирование текущих измерений

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} = X \begin{pmatrix} N_{Th} - N_{Th}^{CP} \\ N_K - N_K^{CP} \end{pmatrix}$$

б/ вычисление коэффициента корреляции $\gamma_i (x_i, y_i)$

в/ проверка значимости отличия γ_i от нуля по критерию Фишера

$$\tilde{\gamma}_i = \frac{1}{2} \sqrt{2k-2} \cdot \lg \frac{1+\gamma_i}{1-\gamma_i} \quad \text{для } i = k+1, \dots, n-k.$$

г/ вычисление условной информации Υ

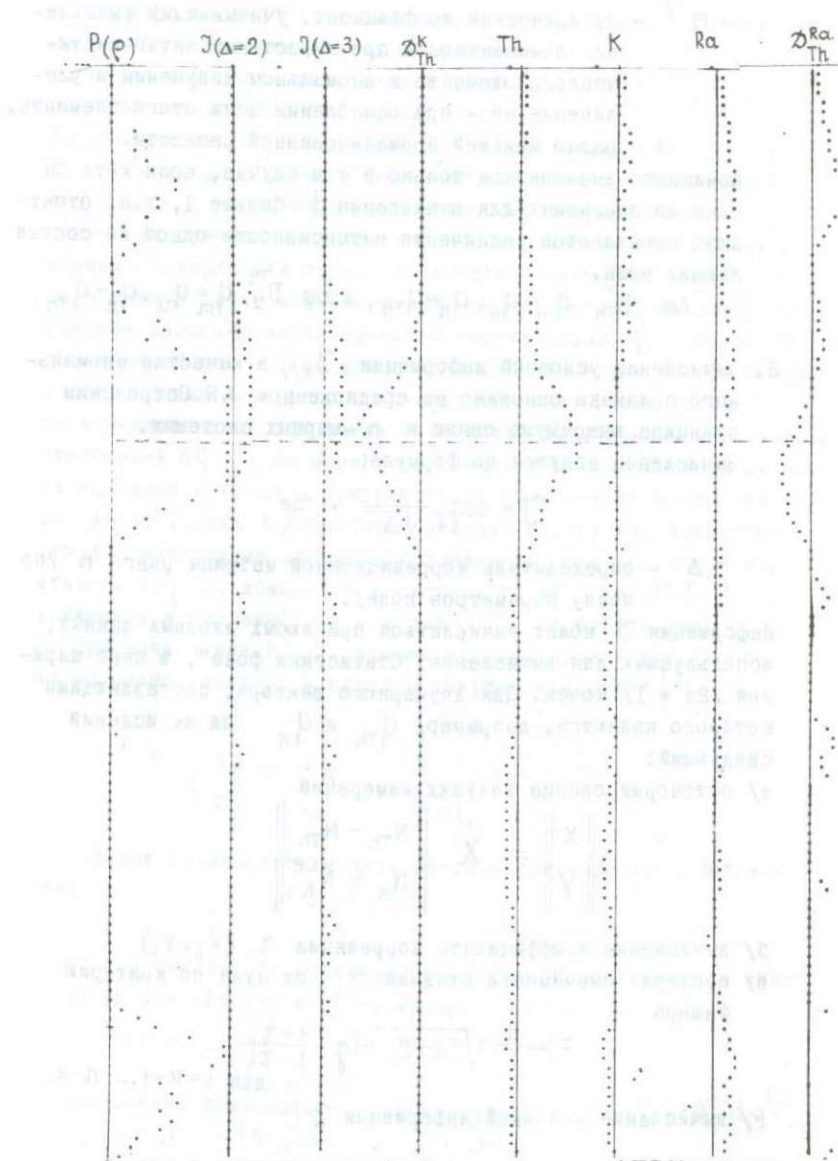


Рис.2. Результаты обработки маршрута АГСМ-съемки над бокситовым месторождением.

$$y = \begin{cases} 0, & \text{если } i \leq K \text{ или } i > n-K \\ 0, & \text{если } z_i \leq z \\ \text{sign } z_i \cdot \frac{1}{2} \lg \frac{1}{\sqrt{1-z_i^2}} & \text{— в остальных случаях} \end{cases}$$

Графический вывод величин $q_{Th}, q_u, q_k, P(\rho), D_{Th}^k, D_u^{Th}$ выполняется программами "График АЦПУ" и "Изолиния АЦПУ".
 Пример обработки маршрута АГСМ - съемки с гамма-спектрометром DiGRS - 300I над бокситорудным объектом /рис. 2/ иллюстрирует работу автоматизированной системы "Аэропоиск-2".

О КАЛИЕВОЙ СПЕЦИАЛИЗАЦИИ РУДООБРАЗУЮЩИХ ПРОЦЕССОВ

Тесная связь урана, тория и калия с химической дифференциацией земной коры и формированием рудных месторождений позволяет использовать эти элементы в качестве радиоактивных индикаторов указанных геологических процессов при АГСМ-исследованиях.

Роль каждого из радиоэлементов в качестве такого индикатора различна. Как известно АГСМ-метод длительное время был направлен исключительно на поиски урановой минерализации. Между тем при поисках месторождений нерадиоактивных руд, как правило, выясняется, что уран /радий/ является сравнительно малоинформативным элементом, что обусловлено низким кларком урана / $3 \cdot 10^{-4}\%$ / в сочетании с нередко наблюдающимся значительным смещением радиоактивного равновесия. Накопление урана отмечается исключительно редко и фиксирует прежде всего собственно урановые рудопроявления.

Торий, в отличие от урана, распространен гораздо шире /кларк - $1 \cdot 10^{-3}\%$ /, в радиоактивном ряду тория нет смещения радиоактивного равновесия, он в значительных количествах накапливается во многих типах изверженных горных пород и сопровождает руды редкоземельных элементов, бериллия, ниобия, тантала, циркония, олова, алюминия /бокситы и глинозёмистое сырьё/ и др.

Среди радиоактивных элементов калий занимает особое положение, поскольку он является одним из главных элементов земной коры /кларк - $2,5\%$ /, играющим важнейшую роль как в процессе дифференциации земной коры, так и при формировании рудных месторождений. Широкое распространение калия в горных породах и накопление его в рудных полях многих типов постмагматических месторождений определяют ведущую роль этого

элемента в качестве радиоактивного индикатора различных геологических процессов при АГСМ-исследованиях. Таким образом, γ -излучение К и Th является наиболее важным для АГСМ-индикации различных типов горных пород и рудных зон.

Радиоактивные элементы и дифференциация земной коры

Как известно /28/, содержание радиоактивных элементов последовательно возрастает при переходе от верхней мантии к базальтовому и андезитовому слоям, достигая максимума в гранитно-метаморфическом слое /табл. I/.

Начальную стадию дифференциации земной коры — переход от дунитов и пироксенитов верхней мантии к океаническим толеитовым базальтам характеризует прежде всего накопление щелочей. При этом содержание калия возрастает в 5 раз, натрия — в 30 раз на фоне практически неизменного содержания урана и заметного понижения содержания тория /табл. 2/.

Если исходить из предположения, что океанические толеитовые базальты являются мантийной выплавкой, следует заключить, что подвижность калия в условиях сверхвысоких температур и давлений заметно снижена по сравнению с натрием. Ведущая роль натрия при концентрации редких и радиоактивных элементов /тория и урана/ за счет мантийного вещества особенно четко проявляется в ультраосновных-щелочных комплексах, сопровождаемых редкометальной минерализацией /альбититы, сиенит-пегматиты, карбонатиты/.

Изменения в содержании калия, тория и урана при переходе от океанических к континентальным базальтам свидетельствуют о принципиальном различии в условиях их формирования. По-видимому, переработка практически стерильных по содержанию радиоактивных элементов океанических базальтов при их погружении по зонам Бенъофа ведет к резкому обогащению их калием, торием и ураном. При этом содержание калия увеличивается в 5 раз, тория и урана — в 9-10 раз, заметно возрастает содержание рубидия — геохимического аналога калия, тогда как содержание натрия /и кремнезема/ практически не меняется /табл. 2/. Аналогичная тенденция к увеличению содержания калия и других радиоактив-

Таблица 1

Слои земной коры	Вероятная средняя мощность слоев, км	K, %	Th, $10^{-4}\%$	U, $10^{-4}\%$
Осадочный	5	1,5	7,0	2,6
Гранитно-мета- морфический	10	3,0	18,0	4,0
Андезито-мета- морфический	5	2,4	9,0	2,5
Базальтовый	10	0,6	2,0	0,8
Верхняя мантия /каменные метео- риты/	1000	0,06	0,040	0,14

Таблица 2

Порода	вес, %		$10^{-4}\%$		
	K	Na	Th	U	K/Rb
Хондритовые метео- риты	0,10	0,68	0,04	0,014	330
Дуниты-перидо- титы	0,035	0,06	1,0	0,1	210
Толеитовые океаничес- кие базальты	0,18	1,65	0,17	0,09	1060
	0,11-0,24				
Толеитовые платфор- менные базальты	0,8	1,60	1,6	0,8	260
	0,6-1,05	1,4-2,0			
Андезито-базальты островных дуг	1,10	2,5	3,0	0,6	700
	1,00-1,60	2,3-3,0			
Андезито-базальты континентов	2,5	2,9	3,5	2,0	260

ных элементов прослеживается при переходе от андезито-базальтов островных дуг к андезито-базальтам континентов.

Таким образом, если рассматривать океанические базальты как обогащенные щелочами выплавки из дунит-перидотитового слоя, а платформенные – как продукт переплавки океанических базальтов на фоне их контаминации глубинным материалом платформенных плит, можно отметить, что обогащение калием в платформенных базальтоидах сопровождается заметной концентрацией редких металлов – тория, урана, рубидия.

В гранитоидах содержание всей триады радиоактивных элементов резко возрастает, причем прослеживается постоянная положительная корреляция между калием и торием. Она характерна как для процессов региональной гранитизации /36/, так и для интрузивных массивов. Если плагиограниты, богатые кальцием и натрием, содержат в среднем /вес. %/: $3 \cdot 10^{-4}$ урана, $10 \cdot 10^{-3}$ тория, 2,0 калия, то в щелочных калиевых массивах отмечается до $8 \cdot 10 \cdot 10^{-4}$ урана, $30 \cdot 60 \cdot 10^{-3}$ тория, 6–8,0 калия.

Щелочные высокорadioактивные граниты формируются на поздних стадиях развития подвижных поясов, в зонах тектономагматической активизации, они неизменно присутствуют в металлогенических провинциях и с ними, как правило, генетически связаны рудные месторождения. В ряде случаев в калиевых гранитах установлены повышенные содержания бериллия, молибдена, олова, вольфрама /28/; аналогичное явление отмечается для эффузивных аналогов – липаритов и трахилипаритов.

В щелочных породах группы нефелиновых сиенитов наиболее четкая положительная корреляция отмечается между общей щелочностью и коэффициентом впаитности, с одной стороны, и торием-ураном – с другой. Агпайтовые нефелиновые сиениты отличаются от миаскистовых более высоким содержанием тория и урана /22/.

Калий и региональная металлогения

В последнее время исследователи обратили внимание на высокую концентрацию калия в сквозных разломах-линеаментах, обладающих признаками глобальных структур наиболее глубокого заложения. Характерным признаком их является нарастание калиевой щелочности вглубь континентов. Одним из первых это показал для Северо-Американского континента Мур /29/, состав-

живший схему изменения неоген-четвертичных вулканических серий вдоль глобальных широтных разломов 38 и 40 параллелей. По данным Мура, максимумы содержания калия совпали с участками повышенного содержания урана, свинца и фтора.

По данным Фаворской и др. /29/, размещение всех крупных рудных объектов неизменно контролируется системой линейментов или зонами их пересечений. Типичными для этих глобальных разломов являются ультраосновные излияния, преобладание щелочных базальтоидов толеитового ряда, щелочноземельных андезитов и богатых калием поздних выплавов, представленных щелочными липаритами и гранитоидами. Таким образом, рудоконцентрирующие зоны трассируются изверженными породами высокой щелочности, в них устанавливается повышенный фон калия, урана, тория, бора, фтора, хлора. Эти черты характеризуют систему рудоконтролирующих зон как планетарный каркас глубинных структур, вдоль которых поступают продукты дегазации мантии – легкоподвижные и летучие компоненты. Для рудных узлов устанавливается тесная структурно-геологическая ассоциация со щелочными базальтами и богатыми калием гранитоидами. Иначе говоря, формирование рудоносных структур идет на фоне возрастающей активности щелочей, причем роль континентальной коры проявляется в калиевой специализации рудообразующих процессов.

Калий – индикатор рудного процесса

Как отмечено выше дифференциация земной коры и концентрация рудных элементов в обогащенных щелочами выплавках неизменно сопровождаются накоплением калия, тория и урана. Постмагматические рудообразующие процессы нарушают эту схему и ведут к уменьшению положительной корреляции между радиоактивными элементами.

Если для графических микроклиновых пегматитов /высокотемпературный расплав-эвтектика/ отмечается совместное накопление всей триады радиоактивных элементов /I4/, то следующий этап – высокотемпературная альбитизация этих же пегматитов – сопровождается исчезновением положительной корреляции и проявлением антагонизма в поведении калия, с одной стороны, и тория – урана – с другой.

Высокотемпературная гидротермально-пневматолитовая

/грейзеновая/ стадия рудообразования с оловом, вольфрамом, бериллием также сопровождается значительным выносом калия из вмещающих пород и накоплением тория, реже урана. Антагонизм калия и тория с накоплением тория и выносом калия характерен для таких широко распространенных гидротермальных процессов, как окварцевание, карбонатизация, флюоритизация.

В то же время калий в ряде случаев выступает в качестве самостоятельного радиоэлемента-индикатора рудных зон. Работы последних лет [21] показали, что калий для многих типов гидротермальных месторождений является ведущим элементом, концентрирующимся как в рудных залежах, так и в околорудноизмененных вмещающих породах. В зависимости от температуры и глубины рудообразования, определяющих, в свою очередь, R^H среды и активность различных компонентов рудного раствора, минералогическая форма нахождения калия сильно варьирует. Наиболее обычны следующие типы калийсодержащих метасоматитов /снизу вверх/: биотитовые /флогопитовые/, кварц-микроклиновые, кварц-мусковитовые, санидиновые, кварц-адуляровые, кварц-адуляр-серицитовые, кварц-серицитовые, адунитовые. За исключением трех первых, все перечисленные метасоматиты являются фациями формации вторичных кварцитов.

Ослуженение /биотитизация, флогопитизация, мусковитизация/ в широких масштабах отмечается на многих типах месторождений. Флогопитизация характерна для собственно флогопитовых и вермикулитовых месторождений; биотит и флогопит в значительных количествах сопровождают некоторые типы редкометалло-бериллиевой и золоторудно-полиметаллической минерализации; обильное развитие мусковита отмечается на оловорудных и оловянно-вольфрам-бериллиевых месторождениях. Высокая концентрация калия характерна для микроклин-мусковитовых пегматитов. Содержания калия в таких рудных зонах достигают 6 - 8%, что в 2 - 3 раза превышает фоновые содержания этого элемента во вмещающих породах.

В структурном отношении зоны калиевого метасоматоза, входящие в формацию вторичных кварцитов, приурочены в массивах изверженных пород к тектоническим зонам; в вулканитах они обычно подчинены структурным элементам кальдерных сооружений. Мощность метасоматитов нередко достигает сотен метров,

содержание калия составляет 8 - 10%, что значительно превышает кларк калия и его средние содержания во вмещающих породах.

Таким образом, калий является радиоактивным индикатором указанных метасоматитов. Важную роль для АГСМ-метода играет тот факт, что накопление калия в рудных зонах постмагматических месторождений, как правило, сопровождается выносом тория из вмещающих пород и рудных метасоматитов. Антагонизм калия и тория с накоплением калия объясняется образованием легко-растворимых комплексных ториевых соединений в щелочной калиевой среде. Это устойчивое явление широко развито в кварц-адюлярных, кварц-микроклиновых, адюляр-серицитовых метасоматитах.

Околорудные изменения, сопровождающиеся мощной концентрацией калия, характерны для многочисленных месторождений золота, серебра, молибдена, меди, свинца, цинка, серного колчедана, барита.

Особый интерес представляет тесная геохимическая связь калия с золотом, позволяющая выделить калий в качестве ведущего радиоактивного элемента-индикатора при поисках золота в вулканогенных толщах и в зонах мезо-кайнозойской активизации. Ниже рассматриваются некоторые особенности геохимии калия на золоторудных месторождениях.

Геохимическая история золота двойственна: металл относится к группе элементов, кларки которых заметно понижаются при переходе от ультраосновных к основным и кислым породам. В этом отношении аналогами золота являются такие симпатические элементы, как платина, кобальт, никель и железо.

Однако рудные концентрации золота наблюдаются в ассоциации со свинцом, цинком, медью, молибденом, сурьмой, мышьяком, ртутью, для которых характерна концентрация в сиалической оболочке Земли.

Эта двойственность геохимической истории золота свидетельствует о роли как мантийного, так и глубоко преобразованного корового вещества в процессе формирования золоторудных месторождений. С.Д.Шер /30/ отмечает, что в архее-протерозое широко распространены месторождения золота, генетически

связанные с эволюцией очагов базитовой магмы при весьма подчиненном участии процессов анатексиса и палингнеза сиалического слоя. В мезозое золотое оруденение обнаруживает наиболее тесную связь с обогащенной калием гранитной магмой.

В наиболее молодых геосинклинальных системах ведущая роль среди источников эндогенного золотого оруденения вновь переходит к базитовой магме. Однако комплексы магматических пород, с которыми связано золотое оруденение, несут гораздо более значительные следы взаимодействия с веществом коры, что отражается в появлении обогащенных калием андезитовых и трахиандезитовых-трахидацитовых комплексов.

Положительная корреляция между калием и золотом отмечена Н.Л. Шилиным для миоценового золотоносного вулканоплутонического комплекса Камчатки, представленного габбро-гранодиоритами и их эффузивными аналогами — туфолавами и туфами /30-а/.

По данным Г.Н. Аношина и В.В. Капезинских, изучавших четвертичный вулканизм Камчатки [1], повышенное среднее содержание золота наблюдается в тех разновидностях базальтов, андезитов и кислых пород, для которых отмечается относительно более высокое среднее содержание калия. Это положение находит постоянное подтверждение для изверженных пород Японии, Филиппин и многих других вулканических зон.

Приведенные данные свидетельствуют о том, что геохимическая общность калия и золота прослеживается как при эволюции магматических пород, так и при проявлениях типичных околорудных изменений, сопровождающих золоторудную минерализацию.

Значительное накопление калия /адуляризация, серицитизация, алуинизация/ типично для месторождений золото-халцедон-кварцевой и золото-сульфидно-халцедон-кварцевой формаций на близповерхностных месторождениях мезозойской и кайнозойской зон складчатости. К этому типу относятся сотни месторождений и рудопроявлений Тихоокеанского рудного пояса и Альпийской складчатой зоны. Аналогичны по характеру минерализации и по интенсивному накоплению калия крупные трещинные зоны в консолидированных участках земной коры /зоны адуляризации на Алданском щите, балейский тип минерализации в Забайкалье и т.д./.

Изучение особенностей локализации калиевого метасоматоза и приуроченности к ним рудных тел на одном из типичных месторождений Охотско-Чукотского вулканогенного пояса /23/ показало, что в палеовулканоструктуре зоны адуляризации приурочены к концентрическим и радиальным трещинным зонам, расположенным вокруг палеоокеанов. Серидитизация характерна для периферии рудного поля, адуляризация — для верхних горизонтов месторождения.

Адуляризация избирательно развита по туфам и субвулканическим телам липаритового и липарит-дацитового состава, содержание K_2O в адуляритах возрастает до 7-10% по сравнению с 3% в неизмененных липарит-дацитах. Рудная минерализация приурочена исключительно к зонам адуляризации.

Аналогичная минерализация в сходных геологических условиях характерна для зон альпийской складчатости в Закарпатье и Западных Карпатах. Широкое развитие калиевых минералов — санидина, адуляра, глауконита и селадонита типично для неогеновых золоторудных месторождений Венгрии, Румынии, Чехословакии.

Наряду с зонами адуляризации высокая концентрация калия в пределах золоторудных полей характеризует кварц-гидрослюдистую фацию формации вторичных кварцитов. Этот тип изменений распространен в вулканитах, но наиболее характерен для месторождений золото-кварцевой и золото-сульфидной формаций, широко развитых в палеозойских складчатых зонах Евразии. Этот тип окорудных изменений является ведущим для Алтае-Саянской, Уральской, Казахстанской и Средне-Азиатской провинций, где окорудные метасоматиты представлены березитами.

По данным многочисленных анализов, образование березитов сопровождается привнесением калия и углекислоты и выносом натрия и кремнезема. Содержание калия в березитах достигает 6-7% при пониженном /сравнительно с замещаемым субстратом/ содержании тория.

Наши исследования в Средней Азии показали, что в ряде случаев /Курамино-Чаткальская рудная провинция/ кварц-гидрослюдистые метасоматические изменения накладываются на андезит-дацитовые эффузивы и гранодиориты и имеют площадное распространение. В этом случае рудные зоны также фиксируются по

Таблица 3

Распределение РАЭ в исходном субстрате и в зонах гидротермального изменения золото-серебряных месторождений Охотско-Чукотского вулканогенного пояса, Ср.Азии и Закарпатья

Район	Тип породы	Содержание, $10^{-4}\%$			Сод.К %	Число анализов
		U	Ra(y.e.U.)	Th		
Северо-Восток	липарито-дациты	6,0	4,0	11,0	2,6	40
	андезиты	4,0	3,0	6,0	2,0	20
	адуляриты по липарито-дацитам	6,0	4,0	5,0	6,4	35
	адуляриты по дацитам	4,0	3,0	3,0	4,0	27
В.Узбекистан	гранодиориты	8,0	7,0	18,0	3,0	20
	дациты	6,0	5,0	14,0	2,5	20
	хлорит-серицитовые породы	6,0	5,0	12,0	4,2	18
	серицитолиты	7,0	5,0	12,0	6,0	12
Закарпатье	липариты	7,0	5,0	14,0	3,0	10
	адуляриты по липаритам	6,0	4,0	8,0	6,5	10

наиболее высоким значениям калия при наличии пониженных содержаний тория.

Увеличение глубинности оруденения иногда проявляется в появлении на золоторудных объектах кварц-калишпатовых метасоматитов /Казахстан/. В условиях больших глубин были сформированы мощные /до 15 м и более/ кварц-биотитовые метасоматиты, сопровождающие золоторудные кварцевые жилы среди архейских гранито-гнейсов Индостанского дита на крупнейшем индийском месторождении Колар.

Таким образом, формирование многих промышленно важных типов золоторудных месторождений сопровождается значительным накоплением калия (табл.3). Индикация калиевых зон с воздуха при АГСМ-съемке открывает большие возможности для поисков рудных зон. Проблема эта возникла совсем недавно /25/, но уже накопленный материал свидетельствует, что естественное разделение

калия и тория в рудоносных гидротермальных системах дает АГСМ-методу новый очень действенный поисковый признак.

Из рассмотрения вышеизложенного материала следует, что: магматическая дифференциация земной коры идет на фоне постоянной положительной корреляции калия и тория /урана/;

в процессе постмагматического рудообразования происходит уменьшение положительной корреляции между калием и торием; радиоизотоп калия- K^{40} может рассматриваться в качестве ведущего радиоактивного элемента-индикатора при оценке металлогенических провинций на золото, серебро, молибден, медь, полиметаллы.

В.И. Кухтин, Ю.Г. Старников

АЭРОГАММА-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ПРИ ПОИСКАХ РУДНЫХ ЗОН В ПРЕДЕЛАХ ОХОТСКО- ЧУКОТСКОГО ВУЛКАНОГЕННОГО ПОЯСА

В настоящее время в пределах Охотско-Чукотского вулкано-
генного пояса наибольший практический интерес представляют
близкоповерхностные золото-серебряные месторождения. Известно
также достаточное количество существенно серебряных с золо-
том и олово-серебряных рудных объектов, тесно связанных про-
странственно, а зачастую и структурно друг с другом. Имеются
данные о минералого-геохимическом и структурно-генетическом
родстве между олово-серебряной и золото-серебряной формаци-
ями /2/. Таким образом, устанавливается единый рудноформа-
ционный ряд с изменяющимся содержанием золота, серебра и оло-
ва.

Представляет интерес рассмотреть особенности аномальных
вариаций интенсивности составляющих спектра поля радиоактив-
ного излучения /тория, урана, калия/ и фоновых характеристик
поля по данным аэрогамма-спектрометрических съемок как на об-
ширных площадях, так и в пределах локальных рудных полей рас-
сматриваемого рудноформационного ряда.

Если анализ фоновой радиоактивной среды может дать неко-
торую информацию о геохимической специализации развитых
здесь комплексов пород, то изучение АГСМ-характеристик в пре-
делах рудных полей может помочь выявить особенности гидротер-
мального процесса, обеспечившего формирование ассоциаций руд-
ных минералов.

Ниже рассматриваются четыре типичных фоновых системы
Охотско-Чукотского вулканогенного пояса, с тремя из которых
связаны различного типа месторождения указанного рудноформа-
ционного ряда; четвертая взята как эталон безрудной среды.

Для всех четырех фоновых систем геологическая ситуация сходна: преимущественным развитием пользуются кислые вулканы /покровы, экструзивные купола, субвулканические интрузии и дайки/, наряду с которыми достаточно широко представлены и более основные разности пород.

Первая фоновая система. С ней связаны проявления золото-серебряного типа оруденения, характеризующегося весьма широким развитием в пределах рудных полей кислых вулканогенных пород различных фаций глубинности: от субвулканических до покровных. Наряду с ними, но в меньшем объеме, присутствуют вулканы более основного состава. Для большинства рудных участков характерны сложные полифациальные поля пропилитов и вторичных кварцитов. Рудовмещающими, как правило, являются экструзивные и субвулканические тела преимущественно кислого состава, подвергшиеся метасоматическому преобразованию, в основном пропилитового типа. Рудные объекты тяготеют к около-трещинным калиевым метасоматитам, представленным адуляр-гидрослюдисто-кварцевыми, гидрослюдисто-кварцевыми разновидностями. Рудные тела — линейно вытянутые зоны интенсивного окварцевания и адуляризации, жилы выполнения адуляр-кварцевого, кварцевого, карбонат-кварцевого состава. Основную массу жильного материала составляют кварц, кальцит, адуляр. Количество рудных минералов в жилах незначительно, среди них наиболее широко развиты пирит, халькопирит, сульфасоли серебра, электрум, сфалерит, галенит, серебро, аргентит.

Вторая фоновая система. С ней связаны проявления преимущественно серебряного с золотом типа оруденения. В целом геологическая ситуация близка к описанной выше. Широким развитием пользуются кислые вулканогенные породы, наряду с которыми встречаются средние эффузивы, свидетельствующие о контрастном проявлении вулканизма. Рудовмещающими являются субвулканические фельзиты. Устанавливается наличие сложных полифациальных полей пропилитов и вторичных кварцитов. Характерно широкое развитие гидрослюдисто-кварцевых пропилитов со значительным участием хлорита. Рудные тела — жилы и жильно-штокверковые зоны. Жильный материал представлен в основном кварцем, адуляром и хлоритом. Рудные минералы — самородное серебро

с примесью золота, аргентит, галенит, сфалерит, халькопирит, пирит, сульфосоли серебра. В жилах, обогащенных хлоритом, отмечаются повышенные содержания олова.^{х/}

Третья фоновая система. С ней связаны проявления олово-серебряного типа оруденения, тяготеющего к участкам интенсивной гидрослюдизации, окварцевания, каолинизации и хлоритизации вулканогенных пород кислого состава /покровных, экструживных, субвулканических/. Рудные тела представлены хлорит-кварцевыми жилами, прожилково-метасоматическими залежами. Рудная минерализация характеризуется в основном галенитом, пиритом, арсениопиритом, стanniном, касситеритом. В различных, зачастую существенно повышенных количествах, присутствуют пираргирит, аргентит, самородное серебро, блеклые руды.

С четвертой фоновой системой не связаны какие-либо проявления металлических полезных ископаемых. Общая геологическая ситуация сходна с вышеприведенными.

АГСМ-характеристики фоновых полей изучались на площадях от 400 до 1000 кв.км в зависимости от размеров рудных полей и располагающихся в их пределах месторождений, причем характеристики площади с рудной зоной не учитывались. Аэрогамма-спектрометрические исследования выполнялись с кодовыми аэрогамма-спектрометрами АГС-4К и АГС-5К. Обработка информации велась на ЭВМ "Минск-32" по алгоритму "Аэропоиск-2", реализующему статистический анализ фоновых систем и выделение перспективных аномалий по принципам малой вероятности и доминантности /14/. Полученные в результате обработки данных фоновых АГСМ-съемок всех четырех систем распределения интенсивностей составляющих: калия, тория, урана представлены на рис.1 а, б и в; здесь же приведены средние значения составляющих /г, д, е/ и коэффициенты парной корреляции /ж, з, и/.

Их анализ позволяет сделать следующие выводы:

1. Для перспективных фоновых систем Охотско-Чукотского вулканогенного пояса по сравнению с безрудной системой отмечается большая неоднородность распределения калиевой составляющей и возрастание ее интенсивности в среднем.

2. Характер распределения урана не зависит от наличия рудных процессов в системе, т.е. этот элемент при изучении фона мало информативен.

х/ Описание дано по В.Г.Брастовской и др. /4/

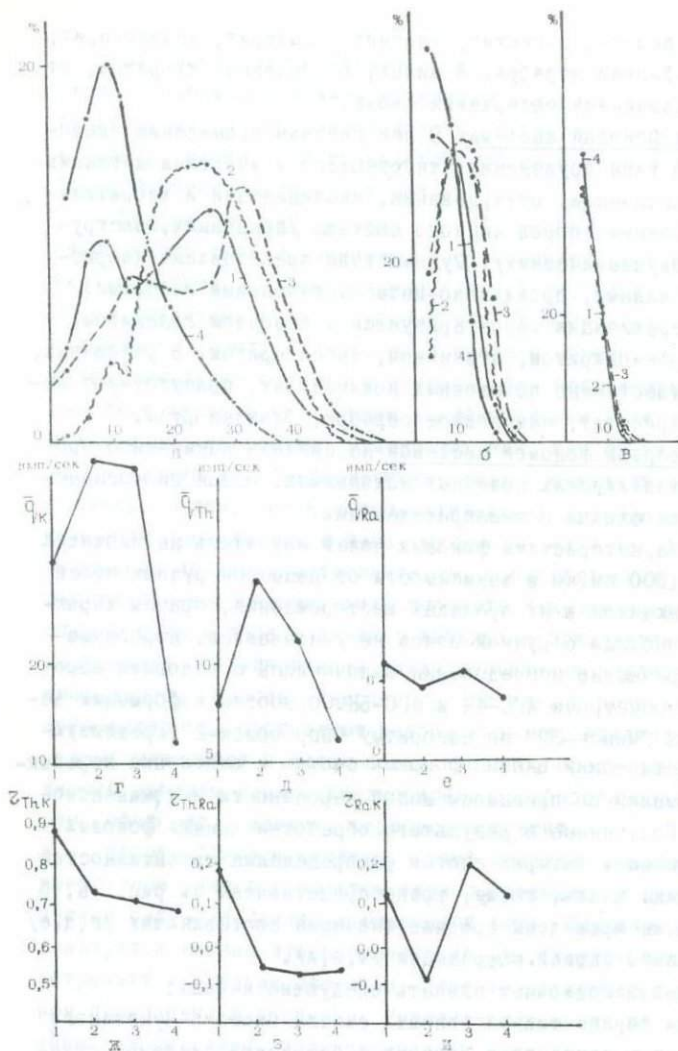


Рис. 1.

Статистические параметры фоновое распределение состава в полях.

1-4 - номера фоновых систем. Кривые распределения содержания радиоактивных элементов по фоновым системам: а-калий, б-торий, в-уран. Средние содержания радиоактивных элементов по фоновым системам: г-калий, д-торий, е-уран. Коэф. взаимной корреляции радиоактивных элементов по фоновым системам: ж-торий-калий, з-торий-уран, и-уран-калий.

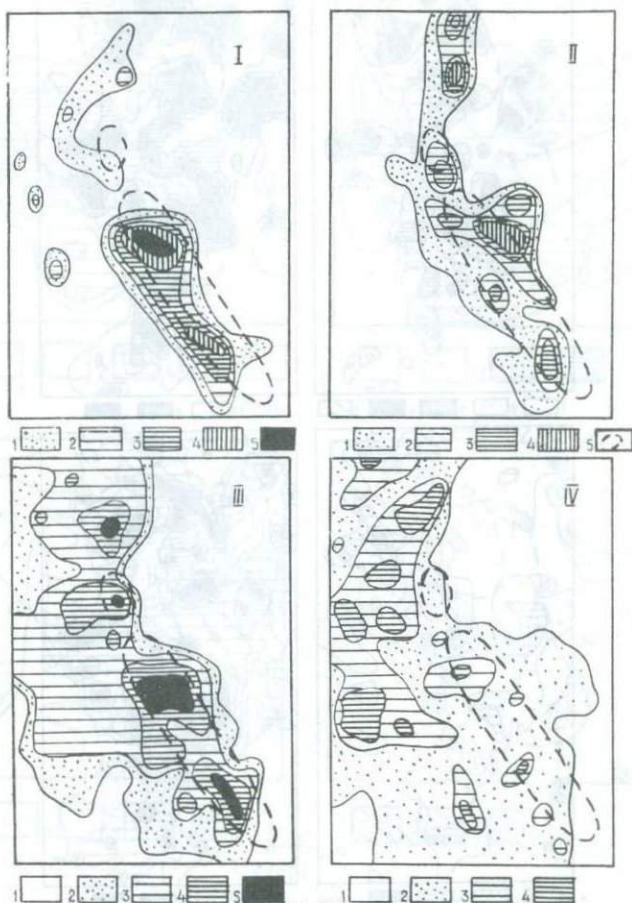


Рис. 2

Карты распределения инновельных индикаторов над зо-
лото-серебряным месторождением
/ д/См-съемка в м-бе 1:25.000/.

- I - Схема распределения "малой вероятности"
 1 - от 0,9 до 0,95 2 - от 0,95 до 0,99
 3 - от 0,99 до 0,999 4 - от 0,999 до 0,9999
 5 - более 0,9999
- II - Схема распределения калиевой доминанты
 1 - от 2 до 3. 2 - от 3 до 4. 3 - от 4 до 5.
 4 - более 5. 5 - метасоматиты адуль-гидро-
 слюисто-кварцевой и гидрослюдисто-кварцевой фации.
- III - Схемы распределения калиевой составляющей
 1 - менее q_k 2 - до $q_k + 3\sigma_k$ 3 - до $q_k + 2\sigma_k$
 4 - до $q_k + 3\sigma_k$ 5 - более $q_k + 3\sigma_k$
- IV - Схема распределения торфяной составляющей
 1 - менее $q_{тн}$ 2 - до $q_{тн} + \sigma_{тн}$
 3 - до $q_{тн} + 2\sigma_{тн}$ 4 - до $q_{тн} + 3\sigma_{тн}$

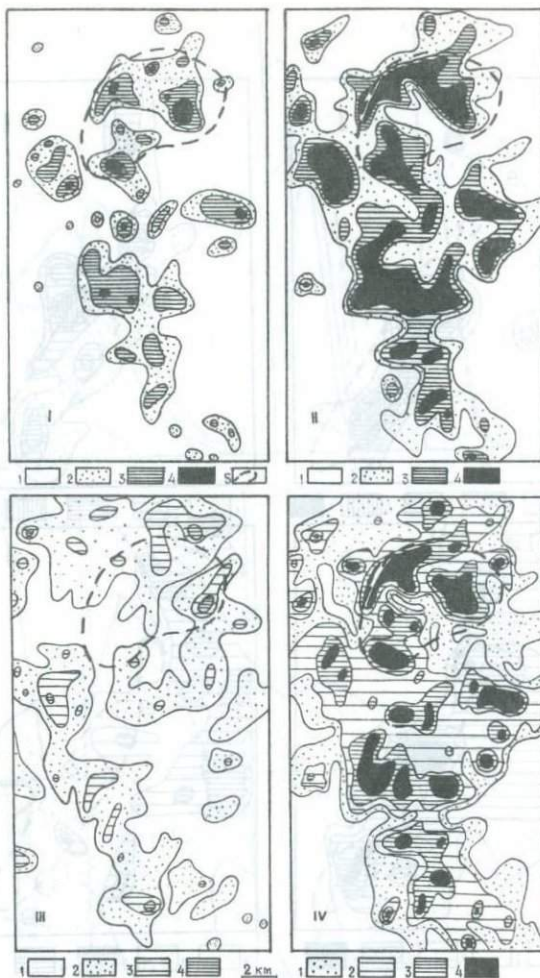


Рис. 3.

Карты распределения аномальных индикаторов над се-
ребренным месторождением /ΔГСМ-съемка в масштабе
1:25.000/.

I - Схема распределения "малой вероятности"

1 - менее 0,99. 2 - от 0,99 до 0,999. 3 - от 0,999 до 0,9999. 4 - более 0,9999.
5 - метасоматиты гидросиликато-кварцевой фации с
хлоритом.

II - Схема распределения калиевой доминанты

1 - менее 4. 2 - от 4 до 6. 3 - от 6 до 8. 4 - более 8.

III - Схема распределения ториевой составляющей

1 - до $q_{Th} + 0q_{Th}$. 2 - до $q_{Th} + 20q_{Th}$. 3 - до $q_{Th} + 50q_{Th}$.
4 - более $q_{Th} + 50q_{Th}$.

IV - Схема распределения калиевой составляющей

1 - до $q_K + 0q_K$. 2 - до $q_K + 20q_K$. 3 - до $q_K + 50q_K$.
4 - более $q_K + 50q_K$.

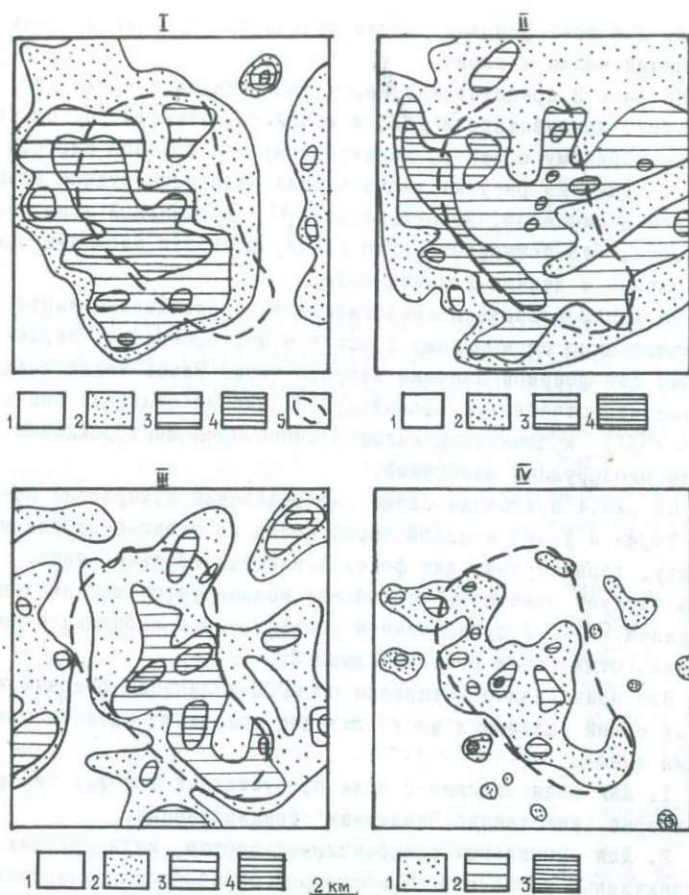


Рис. 4

Карты распределения аномальных индикаторов над олово-серебряным объектом /АГСМ-съемка в м-бе I:25.000/

- I - Схема распределения калиевой составляющей
 1- до $\bar{q}_K + 6\bar{\sigma}_K$. 2- до $\bar{q}_K + 26\bar{\sigma}_K$. 3- до $\bar{q}_K + 30\bar{\sigma}_K$.
 4- более $\bar{q}_K + 30\bar{\sigma}_K$. 5- участки интенсивной гидро-
 слюдизации, окварцевания, каолинизации и хлоритизации.
- II - Схема распределения ториевой составляющей
 1- до $\bar{q}_{Th} + 30\bar{\sigma}_{Th}$. 2- до $\bar{q}_{Th} + 26\bar{\sigma}_{Th}$.
 3- до $\bar{q}_{Th} + 30\bar{\sigma}_{Th}$. 4- более $\bar{q}_{Th} + 30\bar{\sigma}_{Th}$.
- III - Схема распределения радиевой составляющей
 1- до $\bar{q}_{Ra} + 6\bar{\sigma}_{Ra}$. 2- до $\bar{q}_{Ra} + 26\bar{\sigma}_{Ra}$.
 3- до $\bar{q}_{Ra} + 30\bar{\sigma}_{Ra}$. 4- более $\bar{q}_{Ra} + 30\bar{\sigma}_{Ra}$.
- IV - Схема распределения "малой вероятности"
 1- более 0,99. 2- от 0,99 до 0,999. 3- от 0,999 до 0,9999.

3. Для всех фоновых систем отмечается высокий уровень корреляции калия и тория.

На рис. 2 представлены карты распределения калия /в/, тория /г/, доминантности /б/, и малой вероятности /а/ по золото-серебряному объекту, характерному для фоновой системы первого типа. Из рисунка видна четкая индикация рудной зоны калиевой доминантой. Вероятность $P(\rho)$ аномальной зоны весьма высока, что позволяет легко фиксировать эти аномалии при АГСМ-съемке в данном фоновом поле.

На рис.3 приведены аналогичные вышеприведенным карты по существенно серебряному с золотом месторождению, характерному для фоновой системы второго типа. Здесь также следует отметить отчетливую аномальную индикацию большими значениями $P(\rho)$ и доминанты калия рудного поля месторождения и ореола околорудных изменений.

На рис.4 приведены схемы распределения содержания калия, тория и урана и малой вероятности по олово-серебряному объекту, характерному для фоновой системы третьего типа. Здесь следует отметить, что объект индицируется максимальным значением $P(\rho)$ и существенной ролью урана в аномальном излучении /отклонение от фона свыше $3\sigma^2$ /.

Все приведенные материалы по АГСМ-индикации фоновых и рудных полей различных месторождений позволяют сделать следующие выводы:

1. Для радиоактивного поля продуктивных фоновых систем характерна существенно "калиевая" специализация.

2. Для аномальных радиоактивных систем, индицирующих перспективные на золото-серебряное и серебряное оруденение поля гидротермальных изменений характерны высокое значение $P(\rho)$ -малой вероятности, высокий уровень интенсивности калиевой составляющей и интенсивная доминанция калия.

3. Для аномальных радиоактивных систем, индицирующих перспективные на олово-серебряное оруденение поля, характерны высокое значение $P(\rho)$ и существенная роль урана в аномальном эффекте.

*И. Г. Кремнев, Э. Я. Островский,
Л. Н. Котляревский*

ИНДИКАЦИЯ ПРОДУКТИВНЫХ МЕТАСОМАТИТОВ ПРИ АЭРОГАММА-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ В ВОСТОЧНОМ УЗБЕКИСТАНЕ

Район представляет собой горную систему с абсолютными высотами от 800 до 3500–4000 м, включает в себя юго-западные отроги Чаткальского хребта и северные склоны Кураминского хребта, которые являются составными элементами Кураминской структурно-фациальной зоны.

Для исследованной части площади этой зоны характерно широкое развитие в среднем и верхнем палеозое эффузивной деятельности, проявление серии фаз складчатости, сопровождавшихся внедрением интрузивов. Эффузивная деятельность проявилась в период прогибания, в то время как интрузивная — в период воздымания территории, резких складчатых и глыбовых перемещений.

Для района характерна интенсивная гидротермальная переработка пород, проявившаяся в верхнем карбоне, особенно в конце перми, и обусловившая возникновение рудной минерализации.

Металлогенический облик района определяется в первую очередь золото-серебрянными рудопоявлениями средне-поздне-карбонového и ранне-пермского возраста, пространственно тесно связанными с субвулканическими телами как в пределах, так и по окраинам линейных и кольцевых вулкано-тектонических депрессий.

Наиболее типичные золото-кварц-полисульфидные рудопоявления, расположенные в юго-восточной части площади, связаны с жерловыми фациями и приурочены к пропилитизированным андезитам и андезито-дацитам. Золоторудные жилы размещаются,

как правило, внутри зон изменений, представленных хлоритизацией, серицитизацией, окварцеванием и карбонатизацией.

В пределах известных золото-серебро-кварц-карбонатных рудопроявлений южной части северной половины площади исследования вмещающие породы, представленные также андезито-дацитами и андезитами, интенсивно серицитизированы, окварцованы и пиритизированы. Рудными минералами во всех типах рудопроявлений являются пирит, сфалерит, галенит, блеклые руды и теллуриды золота, серебра, висмута и других.

Характерным для района исследований является также наличие редкометалльных рудопроявлений на севере площади, связанных с измененными высокорadioактивными липаритами среднего карбона.

Менее характерны медно-молибденовые рудопроявления на юго-западном окончании площади.

В настоящей статье рассматриваются возможности индикации продуктивных метасоматитов в данном районе по результатам мелкомасштабной фоновой АГСМ-съемки /расстояние между аэромаршрутами 5 км/ и по результатам детальной АГСМ-съемки /расстояние между маршрутами 100 метров/.

Съемки проводились с кодовым аэрогамма-спектрометром АГСМ-5к /датчик - два сцинтиллятора с двумя кристаллами NaI(Tl) размером 200 x 150 мм каждый; общий объем 9400 см³/с высот полета до 100 метров над поверхностью Земли.

Оптимальная спектрометрическая настройка аэрогамма-спектрометра /установка "порогов" и "окон" трех дифференциальных каналов в области фотопиков 2,62 мэв, 1,76 мэв, 1,46 мэв/ производилась на основе данных фоновой съемки, исходя из принципа максимума информации /16,19/.

Выходная информация - скорость счета импульсов, прошедших три дифференциальных канала в единицу времени, и высота полета, - закодированная на перфоленте, обрабатывалась на ЭВМ "Минск -32".

Обработка велась по двум алгоритмам с целью:

1/ выявления специфических полевых систем /15/ в структуре фонового поля /алгоритм обработки данных фоновой съемки/;

2/ выявления перспективных локальных аномалий поля радиоактивного излучения по алгоритму "Аэропоиск-2" /20/ ; алгоритм обработки крупномасштабной, детальной АГСМ -съемки/;

Алгоритм обработки данных фоновой съемки, осуществляющий выявление полевых систем в структуре поля радиоактивного излучения, включает в себя:

1/ осреднение результатов измерений: "тория", "урана", "калия" по фоновым маршрутам скользящим средним с "окном" и "шагом", равными 40 точкам /в нашем случае 40 сек./,

2/ коррекцию осредненных значений за счет устранения из них результатов измерений, полученных на высотах выше 100 метров;

3/ преобразование результатов измерений из размерности "импульсы /сек" в размерность "проценты" на основе коэффициентов перехода от содержаний бортовых рудных моделей "тория", "урана", "калия" к содержаниям радиоэлементов в пределах эталонной площадки на поверхности Земли;

4/ построение интерполяционной поверхности по каждой составляющей поля /моноэлементные карты/;

5/ выделение полевых систем.

Последняя, основная операция обработки, реализуется в принципе на тех же логических основаниях, что и выявление перспективных локальных аномалий в алгоритме "Аэропоиск-2". Фоновым уровнем /или средним фоновой выборки по терминологии, принятой в алгоритме "Аэропоиск-2"/ служат "кларковые" значения интенсивности составляющих поля радиоактивного излучения, равные: для урана - $3 \cdot 10^{-4}\%$, для тория - $10 \cdot 10^{-4}\%$, для калия - 2,5%.

В качестве σ^2 было принято значение, равное 0,5 "кларка".

Выделяемые полевые системы классифицируются на 3-х элементные, 2-х элементные /с высокими значениями "тория" и "калия" или "тория" и "урана" / и одноэлементные.

Подобная классификация, с нашей точки зрения, хорошо согласуется, в самом общем смысле, с региональными геохимически аномальными радиоактивными полями, среди которых наибольший интерес для поисков эндогенного оруденения могут представлять поля развития наложенных процессов калиевой или

натриевой направленности. Следует отметить, что классификацию полевых систем в автоматизированной обработке можно осуществить как на основе указанного выше разделения всей совокупности на трех-, двух-, и одноэлементные системы, так и на основе вычисления доминант /см. алгоритм "Аэропоиск-2"/.

На рис. 1-4 приведены результаты обработки данных фоновой аэрогамма-спектрометрической съемки.

Анализ одноэлементных фоновых карт /рис.1-3/ показывает, что для северной части площади, в отличие от южной, характерны наибольшие интенсивности всех трех составляющих поля, усиливающиеся к северному краю, в пределах которого развиты высокорadioактивные липариты с редкометальными рудопрооявлениями.

Для южной части площади характерны сравнительно низкие значения тория и урана, за исключением северо-восточного и юго-западного её окончаний, где развиты высокорadioактивные интрузивные комплексы.

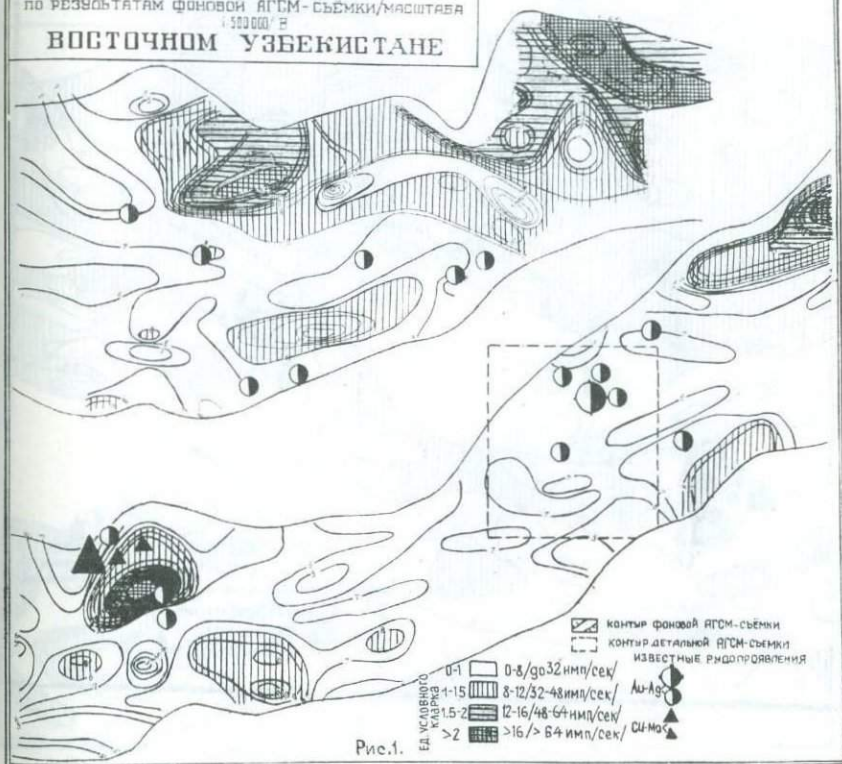
Характерной особенностью данной площади в целом является приуроченность всех известных в ее пределах золото-серебряных рудопрооявлений к низким значениям тория и повышенным калия, что соответствует весьма специфичной полевой системе: "надкларковский" калий - "докларковский" торий. Другой характерной особенностью площади является связь редкометальных рудопрооявлений с трехэлементными и одноэлементными полевыми системами с ведущей ролью урановой составляющей.

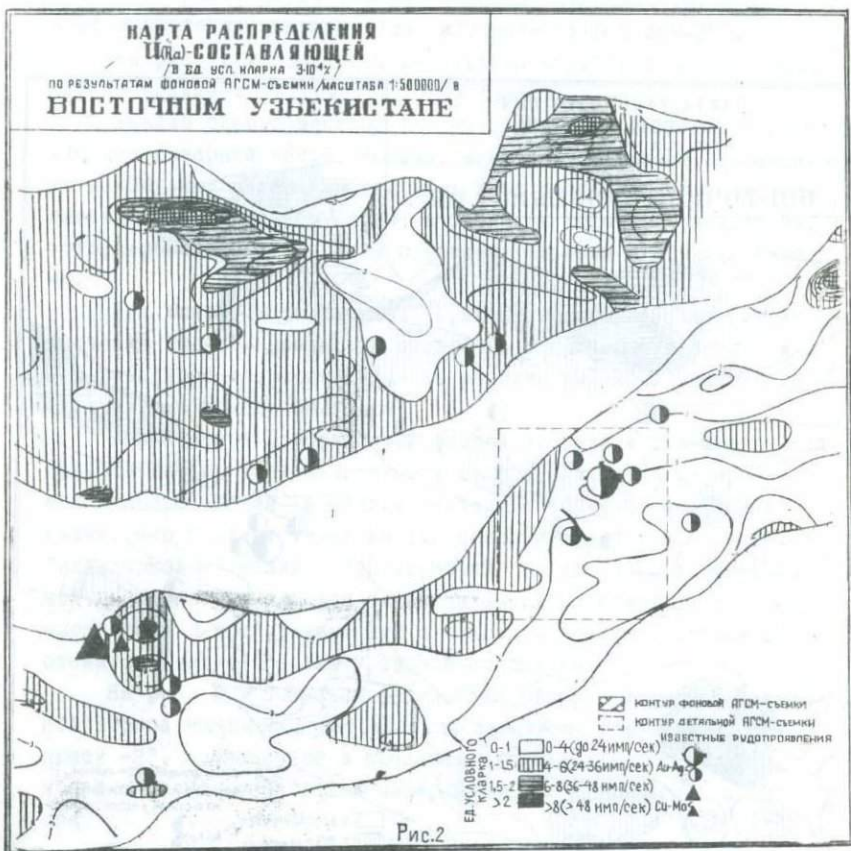
На рис. 5-8 показаны результаты обработки данных детальной аэрогамма-спектрометрической съемки по алгоритму "Аэропоиск -2", проведенной в пределах площади известных рудных полей с золото-серебряной минерализацией и вмещающих их пород.

Площадь сложена вулканогенными породами среднего состава /андезито-порфировая формация/, которые разделены на собственно эффузивную, экструзивную, субвулканическую и жерловую фации. Ведущая роль принадлежит породам субвулканической фации.

Процессы рудоотложения сопровождались интенсивными гидротермальными изменениями вмещающих пород, представленных

КАРТА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ
Т_h-СОСТАВЛЯЮЩЕЙ
/в ед. усл. шкалы 10⁻¹⁰%/
ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ФОНОВОЙ АГСМ-СЪЕМКИ/МАСШТАБ
1:500 000 В
ВОСТОЧНОМ УЗБЕКИСТАНЕ





КАРТА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ Н - СОСТАВЛЯЮЩЕЙ

/в ед. усл. напора 25 з/

по результатам фоновой АГСИ-съемки/масштаб 1:500000/в

ВОСТОЧНОМ УЗБЕКИСТАНЕ

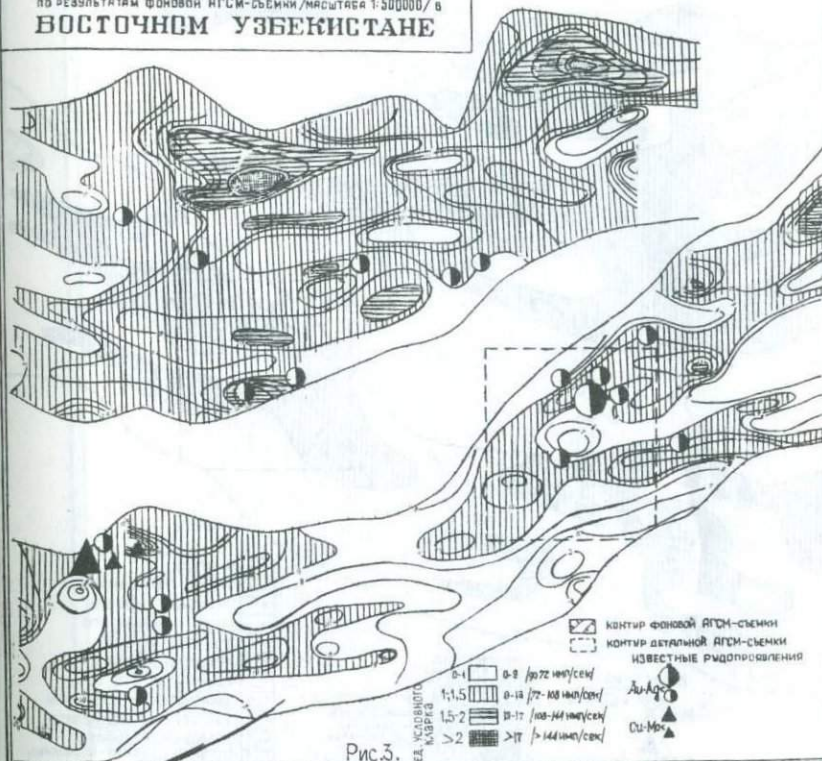


Рис.3.

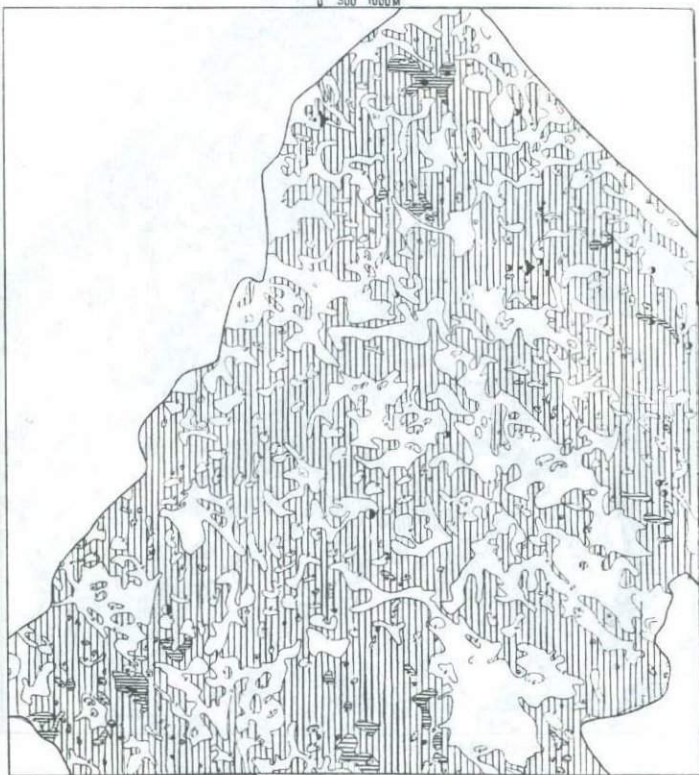
ВОСТОЧНОМ УЗБЕКИСТАНЕ



КАРТА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ тория

ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ДЕТАЛЬНОЙ АГСМ-СЪЕМКИ /В УЗБЕКИСТАН/

0 500 1000 м



- 0-6 ($q+6^2$)
- 6-10 ($q+6^2-q+1.5q^2$)
- 10-14 ($q+1.5q^2-q+26^2$)
- >14 ($q+26^2$)

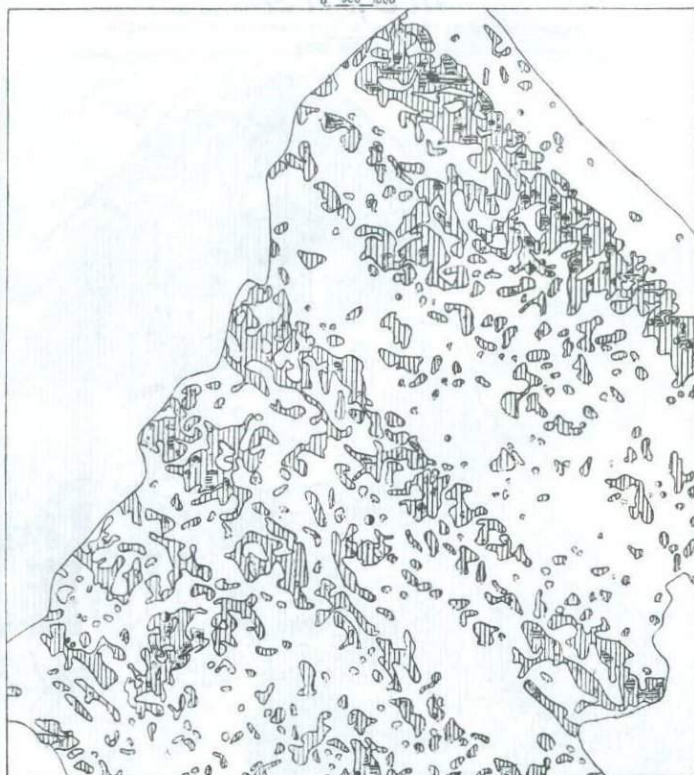
▲ рудопроявления

Рис. 5.

КАРТА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ урана

ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ДЕТАЛЬНОЙ АРСМ СЪЕМКИ /В УЗБЕКИСТАН/

0 500 1000



- $0-4(q+6^2)$
- $4-10(q+6^2q-1.56^2)$
- $6-8(q+1.56^2q+2.6^2)$
- $>8(q+2.6^2)$
- РУДОПРЯВЛЕНИЯ

Рис.6.

КАРТА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ

калия

по результатам детальной АГСМ-съемки / В. Узбекистан /

0 500 1000

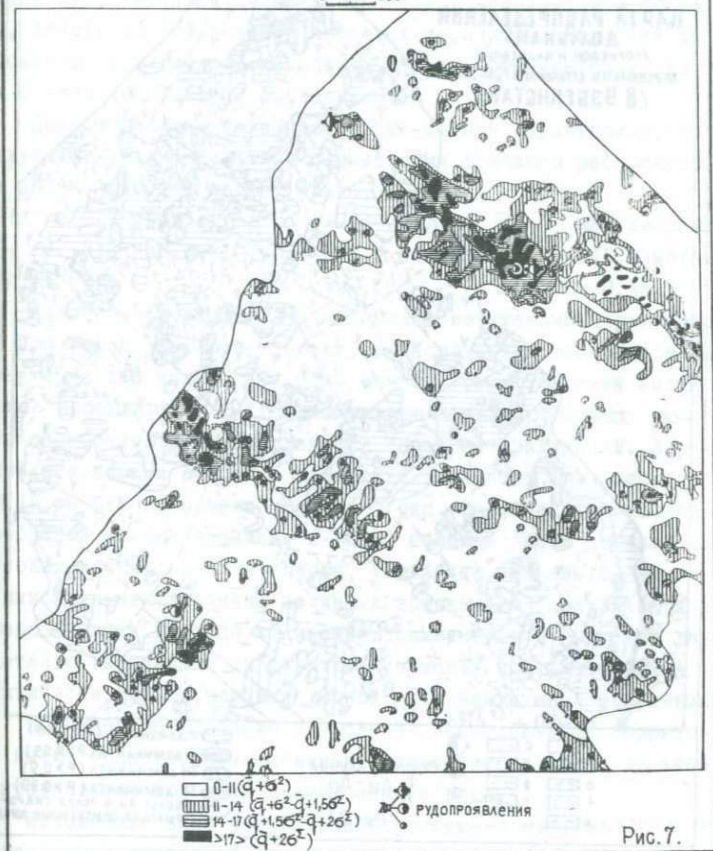


Рис. 7.

**КАРТА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ
ДОМИНАНТ**
/ТОРНЕВОЙ И КАЛЕВОЙ/
ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ДЕТАЛЬНОЙ АГСМ-СЪЕМКИ
/В УЗБЕКИСТАН/



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

Рудопрооявления
 Ау-Аг
 Рис.8.

- К-доминанта ($P > 0.99$)
- К-доминанта ($P > 0.99$)
- Тп-доминанта ($P > 0.9$)
- Тп-доминанта ($P > 0.99$)
- ОРЕОБЫ АУ В ПОЛЯХ ГИПРО-ТЕРМАЛЬНО-ИЗМЕНЕННЫХ ПОРОД

андезитовыми и сиенит-диоритовыми порфиритами. Гидротермальные изменения пород в различных структурных зонах рудного поля различны: по периферии широко развиты вторичные кварциты; в пределах площади рудопоявлений гидротермально измененные породы субширотных межформационных тектоно-структур характеризуются кварц-каолинитовым и кварц-хлорит-серицитовым составом, вплоть до образования сплошных серицитов. Наиболее интенсивное развитие серицитолитов нередко отмечается в участках с наиболее богатым оруденением.

Данная площадь детальной АГСМ-съемки характеризуется следующими статистическими параметрами фонового распределения интенсивностей тория, урана, калия:

$$\begin{aligned} \bar{q}_{Th} &= 12,7 \text{ имп/сек}, & \bar{q}_{Ra} &= 10 \text{ имп/сек}, & \bar{q}_{K} &= 32, \text{ имп/сек} \\ \sigma_{Th}^2 &= 3,6 \text{ имп/сек}, & \sigma_{Ra}^2 &= 4,7 \text{ имп/сек}, & \sigma_K^2 &= 11,4 \text{ имп/сек} \\ z_{Th,K} &= 0,71 & z_{Th,Ra} &= 0,19 & z_{Ra,K} &= 0,45 \end{aligned}$$

Для площади характерен несколько повышенный и равномерный фон тория. Наиболее резкая неоднородность распределения характерна для калия. При этом максимальные значения калия тесно ассоциируют с площадями развития основных золото-серебряных рудопоявлений и точек минерализаций. Характер такой ассоциации особенно отчетливо выступает при рассмотрении карты распределения доминант /рис. 8/. Участки с золото-серебряной минерализацией, а также большая часть площади литогеохимических ореолов золота, устойчиво связаны с областями максимальных значений калиевых доминант. В центральной и северной части площади калиевыми доминантами в пределах двух отчетливо выраженных субширотных калиевых зон фиксируются практически только площади рудной минерализации в эффузивах.

Подчиненное значение в пределах исследованной территории имеют поля ториевых доминант, связанные главным образом с интрузивными породами гранитоидного ряда.

Изложенные выше результаты аэрогамма-спектрометрических исследований позволяют сделать следующие выводы:

1. Применение АГСМ-метода при исследовании магматических комплексов Восточного Узбекистана является весьма эффективным способом индикации площадей развития продуктивных метасоматитов.

2. Ведущая роль при индикации региональных площадей, потенциально перспективных на обнаружение в их пределах рудной минерализации, принадлежит калию и урану, с участием которых формируются специфические полевые системы.

3. Наиболее эффективным индикатором локальных геохимически аномальных радиоактивных систем, с которыми связаны практически все известные золото-серебряные рудопроявления Восточного Узбекистана, являются поля калиевых доминант в пределах маловероятных значений калиевых аномальных зон.

Д. В. Калмыков, Г. Э. Гриневский

ПРИМЕНЕНИЕ КОДОВОГО АЭРОГАММА-СПЕКТРОМЕТРА АГС-4К И АЛГОРИТМА "АЭРОПОИСК-2" ПРИ ПОИСКАХ ЗОЛОТА (НА ПРИМЕРЕ ОДНОГО ИЗ УЧАСТКОВ ОХОТСКО-ЧУКОТСКОГО ВУЛКАНОГЕННОГО ПОЯСА)

В последние годы на Северо-Востоке СССР при поисках близповерхностных золото-серебряных месторождений в эффузивах широко применяется в сочетании с наземными проверочными работами крупномасштабная аэрогамма-спектрометрическая съемка с использованием кодового аэрогамма-спектрометра АГС-4К.

Нами приводится описание методики работ, приведших к выявлению в процессе аэрогамма-спектрометрической съемки золото-серебряного рудопроявления существенно серебряного типа, расположенного в западной части Охотско-Чукотского вулканогенного пояса.

Аэрогамма-спектрометрическая съемка участка работ проводилась по сети параллельных маршрутов широтного направления в масштабе 1:25 000 /расстояние между аэромаршрутами 250 м/ с аэрогамма-спектрометром АГС-4К, установленном на вертолете МИ-4. Средняя высота полета 70-75 м, диапазон изменения высот 30-100 м.

Прибор АГС-4К предназначен для регистрации в воздухе радиоактивного гамма-поля и составляющих компонент его спектра: ториевой, урановой /радиевой/ и калиевой. В качестве датчика использовался крупный /200x150 мм/ кристалл $\text{NaI}(\text{Tl})$, обладающий разрешением 17% по линии 0,66 мев. Устойчивость положения энергетической шкалы обеспечивалась системой автоматической стабилизации, использующей в качестве реперного гамма-источника изотоп Cs ^{137} .

Результаты измерений в АГС-4К выводятся в аналоговом виде в режиме дифференциальных каналов /ДК/ или каналов

"блока содержаний" /БС/ на перьевые самописцы регистратора НЗ20-5 и в кодовом /в режиме ДК/ - на стандартную /шириной 17,5 мм/ перфоленту, обеспечивающую прямой ввод /без перекодировки/ измеряемых величин в универсальные ЭВМ. Интервал накопления информации и периодичность её пробивки перфоратором - 1 сек. Методика полевых работ регламентировалась "Методическими указаниями" /16/.

Спектрометрическая настройка аэрогамма-спектрометра выполнялась на основе принципа максимума сбора информации о полезном сигнале исследуемой среды /19/. Она определила следующие энергетические интервалы измерений ДК:

ДК "тория" 2,35 - 2,9 mev

ДК "урана" 1,66 - 1,96 mev

ДК "калия" 1,31 - 1,60 mev

Измерение интегральной радиоактивности выполнялось в интервале 1,0 - 3,0 mev

Обработка АГСМ-информации выполнялась на ЭВМ "Минск-22" и "Минск-32" по алгоритму "Аэропоиск-2".

По данным мелкомасштабной фоновой съемки участка /м-б 1:500 000/ вычислялся ряд статистических характеристик фоновой среды участка: средние фоновые значения составляющих спектра / $\bar{q}_i$ /, среднеквадратичные погрешности измерения среднего фонового уровня - $\sigma_j^{\text{ф}}$ и "вероятностные сечения" - $\sigma_j^{\Sigma} = \sqrt{(\sigma_j^{\text{ф}})^2 + (\sigma_j^{\Sigma})^2}$; парные коэффициенты корреляции:

$\gamma_{\text{Th}, \text{U}}, \gamma_{\text{U}, \text{K}}, \gamma_{\text{Th}, \text{K}}$.

Эти данные использовались в качестве основы при составлении карт изолиний интенсивностей составляющих спектра /рис. 1/. За единичное сечение карт принимались значения $\sigma_j^{\text{ф}}(j - \text{Th}, \text{U}, \text{K})$ а значениями σ_j^{Σ} характеризовались границы нормальных / $q_j \pm 1,5 \sigma_j^{\Sigma}$ /, повышенных / $q_j + 1,5 \sigma_j^{\Sigma} \div \bar{q}_j + 3\sigma_j^{\Sigma}$ / и аномальных полей / $> q_j + 3\sigma_j^{\Sigma}$ / по каждой из составляющих.

Кроме того, эти же данные, а также парные коэффициенты корреляции между составляющими спектра явились основой для второго, интерпретационного этапа - содержательного уровня обработки, задачей которого является формирование аномального /индикаторного/ сигнала об объекте поиска -

геохимически аномальной радиоактивной среде /14/.

На этом этапе в каждой точке измерения вычисляются аномальные признаки: маловероятные для данной фоновой выборки состояния поля радиоактивного излучения и функция доминантности в системе "калий-торий".

Мера малой вероятности оценивается при помощи функции $P(\rho)$. Текущее измерение относится к аномальному, если $P(\rho)_i$ превышает пороговое $P(\rho)_t$, принятое равным $0,9 - P_0$.

В пределах участков с аномальным излучением $/P_j > P_0/$ оценивалась интенсивность перераспределения тория и калия, определяемая параметром доминантности Π_{Th}^K . Поскольку этот параметр может количественно характеризовать интенсивность опережающего увеличения калиевой или ториевой составляющей спектра в аномалии (проявление антагонизма тория и калия) он рассматривается в качестве меры перспективности аномального излучения. В первую очередь это относится к доминанте калия, устойчиво связанной с зонами продуктивных гидротермалитов.

Вычисление параметров $P(\rho)$ и Π_{Th}^K производилось по формулам, описанным в статье /15/.

Ниже приводится краткое описание результатов проведенных работ.

Исследуемый участок сложен эффузивными образованиями верхнемелового возраста - липаритами, пирокластическими игнимбритами, туфоигнимбритами. На северо-западе и юго-востоке участок ограничивается протяженными разломами северо-восточного простирания.

Аэрогамма-спектрометрической съемкой выявлены зоны повышенных содержаний калия до 5,0 - 5,5% на общем фоне 2-4% калия /рис.1/.

Содержания урана /по радию/ на площади этих зон близки к среднему фоновому уровню или ниже его, составляя в большинстве случаев $/3,0 - 5,5/ \cdot 10^{-4}\%$. Содержания тория характеризуются в среднем фоновыми значениями, достигая иногда значений $/20-25/ \cdot 10^{-4}\%$.

Несмотря на сравнительно небольшую величину калиевой доминанты $/2-4$ единицы/, значения функции $P(\rho)$ в пределах продуктивных зон достигают 0,99 - 0,999.

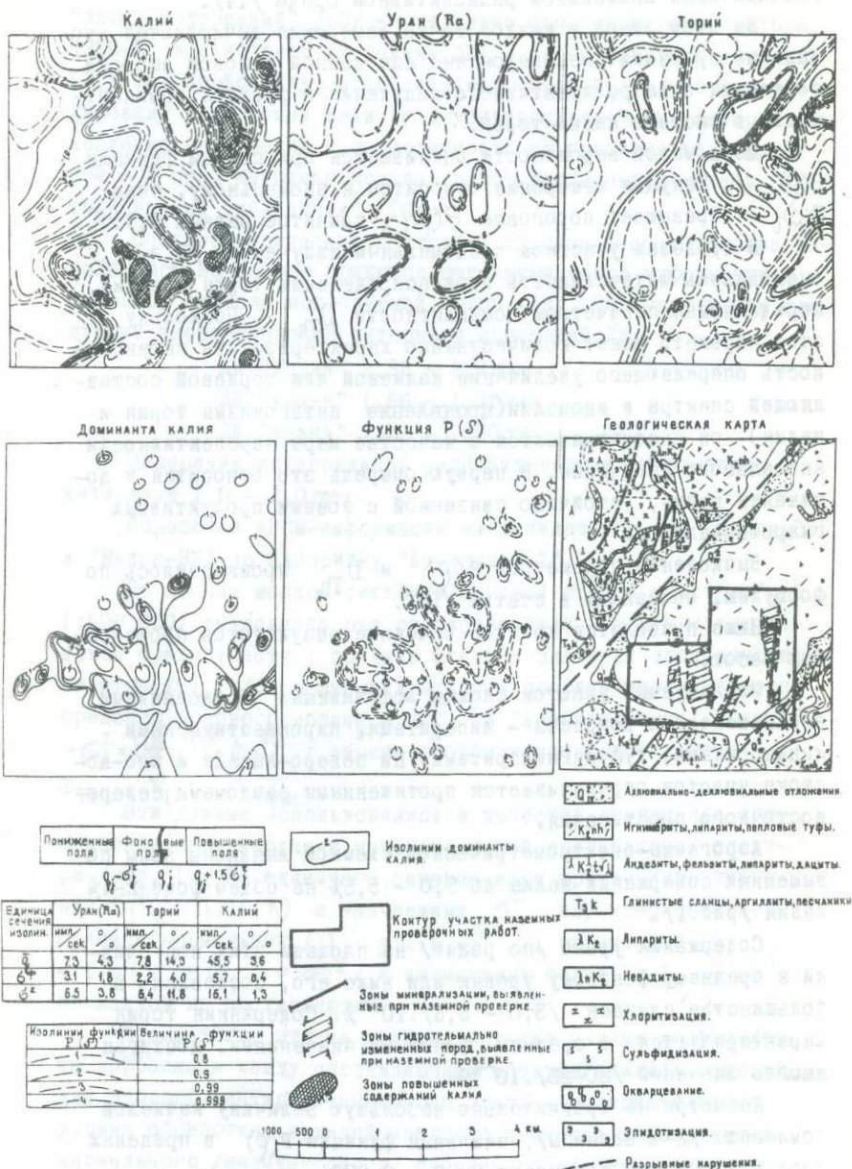


Рис. 1. Результаты АГСМ-съемки участка в одном из районов Охотско-Чукотского вулканогенного пояса.

В качестве критерия для выбора участков, перспективных на обнаружение зон гидротермально измененных пород и связанных с ними золото-серебряных проявлений, было принято наличие на изученной площади зон повышенных и аномальных значений калиевой составляющей в сочетании с высокими значениями функции $P(\rho)$, сопровождающиеся высоким значением параметра доминантности калия. На участках с такими характеристиками были поставлены наземные проверочные работы.

Наземные работы масштаба 1:10 000 выполнялись комплексом методов, включавшим в себя геологическую съемку, гамма-спектрометрию с прибором СП-3, литогеохимическое опробование рыхлых отложений, отбор штуфных проб.

В результате этих работ были выявлены линейные в плане зоны гидротермально измененных пород, совпадающие по площади распространения с зонами повышенных содержаний калия, повышенных значений функции $P(\rho)$ и калиевой доминанты. Гидротермальные процессы в пределах площадей этих зон проявились в виде хлоритизации, эпидотизации и карбонатизации вмещающих эффузивов. Мощность зон гидротермальных изменений от 200 до 450 м, протяженность от 1 до 2 км.

К гидротермально измененным породам приурочены минерализованные зоны с видимой /по делювию/ мощностью до 2-3, иногда 5 м. По простиранию минерализованные зоны прослеживаются, с перерывами, на расстоянии от 100 до 2000 м. Гидротермальные изменения в минерализованных зонах представлены окварцеванием, хлоритизацией, эпидотизацией, серицитизацией, калишпатизацией, ожелезнением. Во всех зонах установлена сульфидная минерализация, представленная пиритом, арсениопиритом, галенитом, аргентитом.

Литогеохимическое опробование рыхлых отложений позволило выявить ореолы вторичного рассеяния серебра с содержанием от 5 до 30 г/т, совпадающие с минерализованными зонами. Помимо этого, установлены ореолы вторичного рассеяния свинца, цинка и меди.

Пробирным анализом в 70 штуфных пробах, отобранных из минерализованных зон, выявлены высокие содержания серебра и золота.

Спектральным анализом в 100 штучных пробах установлены содержания свинца 0,1%, цинка 0,5%, меди 0,03%.

Кроме указанных наземных работ, в методических целях была проведена также наземная проверка участков с повышенными содержаниями калия и тория, которые не сопровождаются высокими значениями функции $P(\rho)$ и калиевой доминанты. Однако здесь не были обнаружены участки гидротермально измененных пород и повышенные содержания металлов в штучных пробах.

Приведенные данные свидетельствуют о высокой геологической эффективности использования кодового аэрогамма-спектрометра и алгоритма "Аэропоиск-2" при выделении участков, перспективных на обнаружение золото-серебряного оруденения, связанного с калиевыми гидротермалитами.

Ф. М. Персиу

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ АЭРОГАММА-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКОГО МЕТОДА ЗА РУБЕЖОМ (КРАТКИЙ ОБЗОР); РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ СПЕКТРОМЕТРА DiGRS-3001

История развития метода

За рубежом аэрогамма-спектрометрический метод получил развитие главным образом в Канаде, США, Великобритании и применялся почти исключительно для поисков урана. Только в самое последнее время появились сведения об использовании АГСМ-метода при поисках ореолов гидротермального изменения пород и выявлении медной и молибденовой минерализации /3/.

Эффективность поискового метода за рубежом оценивают по его способности выделять экономически выгодные объекты с "достаточной чувствительностью без потери избирательности" /36/.

По оценке геологической службы Канады в пределах Канадского щита стоимость наземных съемок в масштабе 1:6000 составляет не менее 2000 долл. за квадратную милю, а АГСМ-съемка с высокочувствительным спектрометром в масштабе 1:40000 и высотой полета 125 м — 80 долл. за квадратную милю при практически равноценной эффективности. Радиометрические съемки стоят на 25-30% дешевле АГСМ-съемок, но в результате потери избирательности появляется огромное количество аномалий для наземной проверки, при этом наиболее ценные аномалии могут быть легко пропущены.

В последнее время применение АГСМ-метода за рубежом выходит за рамки поисков урана и все более ориентируется на поиск эндогенных и экзогенных месторождений Та, Nb, Be, Си, Sn, Au, W, Mo, P, V, бокситов. Подобные работы в СССР были начаты значительно раньше. Несмотря на положительные резуль-

таты применения АГСМ-метода при поисках нерадиоактивного сырья, основной целью съемок за рубежом по-прежнему остаются поиски урановых руд.

По данным "Геологической службы Канады" большинство месторождений урана на Канадском щите характеризуется устойчиво повышенным отношением U/Th , вследствие чего это отношение используют как главный индикатор перспективности аэроаномалий.

A.G.Daitley отмечает, что различные типы горных пород характеризуются сходным /33, 35/ поведением всей триады РАЭ, т.е. породы более радиоактивные содержат повышенные концентрации всех трех РАЭ. И только в редких "необычных" случаях происходит перераспределение РАЭ, характеризующееся более интенсивным приносом одного элемента по сравнению с другими. "Каждый такой случай заслуживает обязательной проверки /необязательно на уран/ именно из-за своей необычности" /34/. Таким образом, канадские геофизики вплотную подходят к пониманию уже сформулированного и используемого в СССР принципа антагонизма РАЭ в зонах околорудных изменений /12/.

Опыт работы в Канаде и других зарубежных странах показывает, что районы, содержащие урановые залежи, имеют повышенную радиоактивность на территории в десятки и сотни квадратных миль. Урановые залежи неизвестны в районах с радиоактивностью ниже средней /35, 36/. Это служит обоснованием применения мелкомасштабных радиометрических съемок для выделения областей повышенной радиоактивности с последующим проведением внутри них гамма-спектрометрической крупномасштабной съемки.

Цель аэрометодов при поисках урана — локализация первичных и вторичных ореолов рассеяния — значительно более реальная, чем выявление непосредственных выходов рудных тел. Среднее эквивалентное содержание урана в ореолах может быть всего на $1-2 \cdot 10^{-4}\%$ больше фона, что вынуждает применять высокочувствительные спектрометры с большим объемом детекторов.

Техника и методика АГСМ-съемок

В табл. I дана характеристика имеющихся на 1971-72 гг.

Таблица 1
Характеристика современных зарубежных и отечественных аэрогамма-спектрометров

№	ИЗГОТОВИТЕЛЬ	НАЗВАНИЕ МОДЕЛЕЙ	ТИП ДАТЧИКА (размер в мм)	ЭНЕРГ. РАЗРЕШЕНИЕ ЛЮС-337 (%)	ТИП СПЕКТРОМЕТРА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО-ИНТЕГРАЛЬНЫЙ	НАЛИЧИЕ СТАБИЛИЗАЦИИ СПЕКТРА	НАЛИЧИЕ КОРРЕКЦИИ КОМП. РАСС.	АНАЛОГ. СИСТЕМА РЕГИСТ.	СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ АНАЛОГОВЫЙ ИНТЕНОМЕТР (% см)	НАКЛАДЕНИЕ ЗАДАВАЮЩЕЙ АРЕИ. ИНТЕРВАЛ (Тон)	НАЛИЧИЕ КОДОВОЙ РЕГИСТРАЦИИ	ПРЯМОЙ ВВОД В ЗВМ	НАЛИЧИЕ АВТОМАТИЗ. ОБРАБОТКИ С ОБНАРУЖЕНИЕМ РИДЕРСКИХ ПЕКИ
1	АВЕМ (ШВЕЦИЯ)	ABA-1501	ОДИН 126 × 152 ИЛИ 254 × 126 NaJ (Fe)	—	Д 4 КАНАЛ	—	—	САМОИЩЕЦ 5 КАНАЛ	И КАНАЛ 1; 2,5; 5; 10 Д КАНАЛЫ - 25; 5; 10; 20	—	—	НЕТ	—
2	COMMERCIAL PRODUCTS DIV AECI (КАНАДА)	CPD-322	ДВ 12 КРИСТ. NaJ (Fe) 230 × 102 (51000 см ²) С ТЕРМОСТАТИРОВАНИЕМ	—	Д 128 КАНАЛ ДИНТЕГР. УЧ.	—	АНАЛОГОВАЯ	6 КАНАЛ.	—	0,1 - 90 СДВЕРЖ. ТАЙМЕР	7-ТРАССОВЫЙ МАГНИТОФОН ИБМ	ЕСТЬ	НЕТ (ТОЛЬКО КОРРЕКЦИЯ)
3		CPD-287	ОДИН NaJ (Fe) 230 × 102 (42500 см ²) С ТЕРМОСТАТИРОВАНИЕМ	—	—	—	—	—	—	1 - 10 АВТОМАТ. ДЛН ИЗМ.	—	ЕСТЬ	—
4		CPD-1920 (ВЕРТОЛЕТ)	ОДИН NaJ (Fe) 126 × 102 (1270 см ²)	—	Д ИНТЕГР. УЧ.	—	—	—	—	0,3 - 30	—	ЕСТЬ	—
5	GEOMETRICS (США) EXPLORANUM (КАНАДА)	DGRS-1001 1000, 1002	2-4 КРИСТ. NaJ (Fe) 152 × 102 (3700 - 7400 см ²)	—	Д ИЛИ И	CS-137 ИЛИ Co-57	—	САМОИЩЕЦ 4 КАНАЛ.	1,2,5 и 10	—	НЕТ	НЕТ	НЕТ
6		DIGRS-2000	—	—	РЕГУЛИРУЕМ. ПОРОГ И ОКНА	—	ЦИФРОВАЯ	—	—	0,1; 0,2; 0,4; 0,5 и 1,0	ЗДВ. - ДЕСЯТ. ЗНАКА НА КАНАЛ	ЕСТЬ	ТОЛЬКО КОРРЕКЦИЯ
7		DIGRS-3000	—	—	—	—	АНАЛОГОВАЯ	САМОИЩЕЦ 6 КАНАЛ.	—	0,1 - 10 С ШАГОМ 0,1	—	ЕСТЬ	—
8		DIGRS-3001	ДВ 15 КРИСТ. NaJ (Fe) 152 × 102 (ДВ 27800 см ²)	15	—	АВТОМАТ. ДЛЯ КАЖДОГО ДАТЧ. (ЕСЛИ БОЛЕЕ 4 КРИСТ.)	—	—	—	—	ЗДВ. - ДЕСЯТ. ЗНАКА НА КАНАЛ	ЕСТЬ	—
9	MCPHAR GEOPHYSICS (КАНАДА)	AV-4	1-2 КРИСТ. NaJ (Fe) 152 × 102 (1850 - 3700 см ²)	16	И	Am-241	НЕТ	САМОИЩЕЦ 4 КАНАЛ	И КАНАЛ - 0,5-5 Д КАНАЛ - 1-5	—	—	НЕТ	НЕТ
10		AV-5	ДВ 9 КРИСТ. NaJ (Fe) 152 × 102 (ДВ 16700 см ²)	—	Д ИЛИ И	Am-241 ИЛИ Co-137 РЕГУЛИР. УСИЛЕНИЕ	АНАЛОГОВАЯ	—	1,2,4 и 8	—	ЗДВ. - ДЕСЯТ. ЗНАКА НА КАНАЛ	ЕСТЬ	НЕТ
11	NUCLEAR ENTERPRISES (ВЕЛИКОБРИТАНИЯ)	NE-8424	4 КРИСТ. NaJ (Fe) 152 × 102 (3700 см ²)	—	Д	НЕТ	—	— 5 КАНАЛ.	1; 2,5; 5	—	НЕТ	НЕТ	—
12	SCINTREX (КАНАДА)	GIS-2	1-4 КРИСТ. NaJ (Fe) 126 × 102 (1270 - 5100 см ²)	—	И 1 КАНАЛ	—	—	1-КАНАЛ. САМОИЩЕЦ	2,8 и 16	—	НЕТ	НЕТ	—
13		GDSA-4	—	—	Д	Am-241	АНАЛОГОВАЯ	САМОИЩЕЦ 6 КАНАЛ	1,3 и 5	—	НЕТ	НЕТ	—
14		GISA-4	—	—	И	—	—	—	—	—	—	НЕТ	—
15		GAD-5	4 КРИСТ. NaJ (Fe) 152 × 102 (7400 см ²) С ТЕРМОСТАТИРОВАНИЕМ	—	Д	—	—	12-КАНАЛ. ДЛЯ КОМП. РАСС.	0,5; 1; 2,5	0,1 - 100	ЗДВ. - ДЕСЯТ. ЗНАКА НА КАНАЛ	ЕСТЬ (КАСЕТН. МАГНИТ.)	ТОЛЬКО КОРРЕКЦИЯ
16	GEOLOGICAL SURVEY OF CANADA	СКАИВЕН	12 КРИСТ. NaJ (Fe) 230 × 102 (10100 см ²) С ТЕРМОСТАТИРОВАНИЕМ	—	128-КАНАЛ АНАЛИЗАТОР	Y-88 ИЛИ CS-137	—	САМОИЩЕЦ ДОПОЛНИТЕЛЬН. ДОЗАРЯДКА ЭЛЕКТРОН. СПЕКТРА	—	0,5 - 5	ЗДВ. - ДЕСЯТ. ЗНАКА НА КАНАЛ	ЕСТЬ	КОМПЛЕКС ПРОГРАММ КОРРЕКЦИИ
17	ГЕОЛОГОРАЗВЕДКА-НПО „ГЕОФИЗИКА“ СССР	АСГ-48	ПЛАСТМАССА 20000 см ³	60	Д	НЕТ	АНАЛОГОВАЯ (БС)	САМОИЩЕЦ 5 КАНАЛ	20; 3,0	—	РЦАГ-16 (МАГНИТНЫЙ) ДЕКОД.	НЕТ	НЕТ
18	НПО „ГЕОФИЗИКА“ СССР	ГСА-70	4 КРИСТ. NaJ (Fe) 200 × 100 (12500 см ²)	20	Д 5 КАНАЛ	Co-60 Р-3 СЛОБОДНИК	—	—	1,5	—	РАЗРАБАТЫ- ВАЕТСЯ	НЕТ	НЕТ
19	ВИМС - СССР	АГС-4к	1 КРИСТ. NaJ (Fe) 200 × 150 (47000 см ²)	15-18	Д	CS-137 АВТОМАТИЧ.	АНАЛОГОВАЯ	САМОИЩЕЦ 5 КАНАЛ	1,0; 1,5	1,0; 20, 50, 100 —	СТАНД. ПЕРИОДИЧ. ЗДВ. ЗНАКА НА КАНАЛ	ЕСТЬ	—
20	—	АГС-5к.6к	2 КРИСТ. NaJ (Fe) 200 × 150 (9400 см ²)	17-18	Д	—	—	—	1,0; 1,5	—	—	—	—

наиболее совершенных зарубежных и отечественных аэрогамма-спектрометров. Приведенные в таблице данные не претендуют на всестороннюю оценку аппаратуры. Ряд достаточно важных параметров /линейность энергетической шкалы, температурная стабильность и т.д./ не отражены в таблице прежде всего из-за отсутствия публикаций.

Как видно из таблицы, ведущими фирмами по производству и эксплуатации аэрогамма спектрометров являются: "Эксплораниум" /Канадский филиал американской фирмы "Джеометрикс"/, "Макфар джеофизикс", "Коммершиал продактс" /"Атомная энергия Канады"/, "Синтрекс". Исключая единичные примеры применения многоканальных установок /до 128 к/, наиболее типичными являются "оконные" /дифференциальные/ 4-х канальные приборы с детекторами объемом $3500-7500 \text{ см}^3$ /2-4 кристалла $152 \times 102 \text{ мм}$ /. Для стабилизации энергетической шкалы в большинстве спектрометров используется способ измерения и сравнения интенсивности двух половин площади фотопика опорного источника / Cs ^{137} или Am ^{241} /. Сигнал разбаланса воздействует либо на напряжение питания ФЭУ, либо на напряжение "порогов" ДК.

Для спектрометров, имеющих более 4-х кристаллов NaI(Tl) , применяется автоматическое выравнивание усиления каждого детектора путем сравнения скорости счета от опорного источника на выходе всех ФЭУ. Наиболее высокочувствительные спектрометры с числом кристаллов более 9 /"Скайвен", СРД-322, Inex / оборудованы термостатом для поддержания постоянной температуры детекторов. Это позволяет получить высокую стабильность. Например, для системы "Скайвен" дрейф средней скорости счета в ДК за 8 час непрерывной работы менее 2,5% без ручной подстройки.

Несмотря на широкое внедрение автоматизированной обработки геофизических данных на ЭВМ, только в последнее время ряд фирм начал применять кодовую регистрацию АГСМ-данных на стандартную 0,5 - дюймовую магнитную ленту в формате IBM или на перфоленту параллельно с аналоговой регистрацией на диаграммную ленту. Характерно, что до недавнего времени обычным было только измерение скорости счета в дифференциальных каналах при помощи аналогового накопителя.

Однако аналоговый выход интенсиметров оказался мало пригодным для цифровой записи результатов. Во многих современных спектрометрах применяется способ накопления импульсов за предварительно установленный интервал времени. Сумме импульсов получается сразу в виде числа и удобна для записи на кодирующую систему. В некоторых аэрогамма спектрометрах периодом накопления импульсов /"временным окном"/ управляет доплеровская система, что позволяет получать измерения с равным шагом, независимо от путевой скорости самолета.

Отмечается устойчивая тенденция к применению спектрометров в комплексе с протонными аэромагнитометрами и аэро-электроразведочными системами, т.е. создание универсальных "летающих" лабораторий". Фирма "Джеометрико" совместно с "Эксплораниум" специально для поисков радиоактивного сырья по заказу "Мексиканского Института Атомной Энергии" изготовила комплексную станцию на легком самолете "Айлендер". Помимо спектрометра DIGRS -300I с 9-ю кристаллами 152×102 мм и протонного магнитометра G -803 /разрешение 0,25 гаммы/ станция оснащена сверхдлинноволновой навигационной системой, кодовым преобразователем и магнитофоном, целевой кинокамерой. Следует отметить быстрое распространение доплеровских навигационных систем, позволивших достигнуть точности определения координат самолета до 0,3% от длины маршрута /7/. Однако известные ограничения доплеровских систем привели к необходимости комплексирования их с инерциальными системами и целевыми кинокамерами. Аппаратура "Скайвен" например, оборудована телевизионной кинокамерой со 110-градусным объективом и видеоманитофоном.

Как следует из табл. I, наиболее совершенные зарубежные спектрометры - DIGRS-300I и "Скайвен".

Общим для них является:

1. Большой объем детекторов-кристаллов $\text{NaI}(\text{Tl})$ до 52000 см^3 .

Следует отметить, что стоимость одного кристалла 152×102 мм - 4300 долл. 230×102 мм - 7000 долл./в ценах 1971 г./

2. Автоматическая стабилизация энергетической шкалы

измерений путем использования спорных источников. В установках, где более 4-х кристаллов, используется система автоматического выравнивания усиления импульсов каждого блока.

3. Аналоговая коррекция комптоновского рассеяния с регистрацией результатов на аналоговые самописцы.

4. Кодовая регистрация на перфоленту или магнитную ленту числа импульсов в единицу времени с выхода каждого дифференциального канала /ДК/. Возможность прямого ввода информации в универсальные ЭВМ обеспечивается применением стандартных форматов кодирования и стандартных /машинных/ магнитных лент и перфолент.

5. Отказ от использования интенсиметров при аналоговой регистрации и переход на регистрацию числа импульсов, накопленного за установленный временной интервал.

Интересно отметить эволюцию принципиальной схемы спектрометров фирмы "Эксплораниум". После выпуска аналогового прибора серии 1000 /табл. I/, был создан единственный в своем роде спектрометр DiGR3-2000, имеющий встроенный цифровой вычислитель. Этот блок производил коррекцию комптоновского рассеяния непосредственно в цифровом виде и последующую кодовую регистрацию скорректированного, "истинного" числа импульсов в каждом ДК. Однако в дальнейшем этот способ был признан неудачным и в настоящее время фирма выпускает приборы серии 3001 с кодовой регистрацией измеренного в каждом ДК числа импульсов без коррекции. Вся последующая обработка данных АГСМ-съемок производится только на универсальных ЭВМ. Аналоговая коррекция комптоновского рассеивания используется для визуального, надежного выделения аномалий под наземную проверку непосредственно в процессе съемки /по лентам аналоговой регистрации/.

Отмеченные выше характерные особенности лучших зарубежных гамма-спектрометров отражают общую тенденцию развития АГСМ-метода. Как видно из таблицы, наиболее полно эти особенности воплощены в отечественных спектрометрах АГС-4к /5к, 6к/, созданных значительно раньше зарубежных. Спектрометры типа АГС-4к имеют решающее преимущество перед зарубежными в том, что они обеспечены автоматизированной системой обработки данных на ЭВМ типа Минск-32, М-222. Эта

система - "Аэропоиск-2" - реализует помимо типовой обработки данных обнаружение геохимически аномальных радиоактивных зон /14,15,20/.

Наиболее совершенные зарубежные аэрогамма-спектрометры используются в основном на скоростных самолетах /200-340 км/ч при средней высоте съемки 125-150 м. Увеличение высоты полета и объема детекторов основаны на геохимической концепции, отмеченной выше и заключающейся в том, что основной целью АГСМ-метода является обнаружение больших площадей слабого обогащения ураном, а не "точечных" источников - выходов рудных тел.

Рядом авторов доказывается неизменность спектра естественного гамма-излучения на высотах до 200 м.

Весьма любопытно сравнение различных АГСМ-систем, сделанное A.Darby /34/ и приведенное на табл.2.

В соответствии с этой таблицей малые по площади участки за счет снижения высоты и скорости полета могут быть обнаружены с менее точными приборами также эффективно, как и системой "Скайвен" /при использовании ее со стандартной высоты в 122 м/. В то же время подчеркивается, что любая система, которая планируется для региональной съемки, в первую очередь оценивается по способности выявлять большие по площади участки относительно слабого повышения концентраций радиоэлементов. Приведенная формула вычисления эффективности вряд ли может быть пригодна для оценки преимуществ какого-либо спектрометра перед другими, поскольку вся формула вытекает из упрощенной эмпирической зависимости точности измерений от объема датчика, высоты и скорости полета без учета вариаций поля радиоактивного излучения всей исследуемой среды и способов обработки и интерпретации данных. Сравнение достоинств и недостатков съемочных систем может быть сделано только на основе анализа регистрации конкретной фоновой среды в выбранных энергетических интервалах. Такой способ на основе анализа информации о среде исследования приводится в /16,19/.

Как отмечалось выше, одной из характерных особенностей поисковой АГСМ-съемки за рубежом является увеличение в 2 раза по сравнению с принятой в СССР рабочей высоты полета - до 150 м. Эта мера, по мнению ряда авторов, позволяет прео-

Табл. 2
Система "Скайвен" принята за 100 единиц.

Название системы	детектор		Высота полета /м/	Скорость /км/час	Мера эффектив.	
	размер /мм/	объем /см ³ /			для больших участков	для локальных участков
1. Картировочная система "Скайвен"	12/228x102	50000	122	192	100	100
2. Разведочная система "Скайвен"	6/228x102	25000	152	224	36	27
3. Вертолетная система "Геологической службы Канады"	3/127x127	4840	77	48	51	99
4. Коммерческая А	4/152x102	7430	91	144	24	35
5. -"	Б 1/304x102	3300	38	128	16	101
6. -"	В 1/152x127	2310	45	96	14	45
7. -"	Г 3/152x102	5580	45	202	16	51

Мера эффективности в этой таблице вычислялась по формулам:

большие участки
$$\frac{V_x}{50000} \cdot \frac{192}{S_x} \cdot \frac{100}{e^{(\mu(122-H_x))}}$$

локальные участки
$$\frac{V_x}{50000} \cdot \frac{192}{S_x} \cdot \frac{122^2}{(H_x)^2} \cdot 100, \text{ где}$$

V_x - объем детектора в см³
 S_x - средняя скорость в км/ч
 H_x - средняя высота полета
 μ - $5,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-1}$

долеть недостатки низкополетных /30-70 м/ съемок: зависимость регистрируемых особенностей поля от поверхностных неоднородностей, обнаженности, геометрии измерений и т.п. /33,34/.

Способы обработки измерений

Выполняя съемки по контрактам с горными компаниями, геофизические фирмы представляют заказчику карты "содержаний" радиоэлементов /"торий", "уран", "калий"/. Геолого-геохимическая интерпретация производится специалистами горных компаний.

Характерно, что АГСМ-съемки, выполняемые с высокочувствительными приборами с кодовой регистрацией, называются аэрогамма-спектрометрическим картированием /3/. Поэтому обработка АГСМ-данных даже при использовании ЭВМ заключается в выполнении последовательности операций преобразования зарегистрированных скоростей счета на выходе ДК в единицы концентраций. Это преобразование основано на очень грубом допущении о существовании однозначной связи между концентрацией РАЭ в горной породе и измеряемой в полете интенсивностью излучения /3, 31/.

Полный цикл обработки АГСМ-данных включает следующие основные операции:

1. Вычитание остаточного фона.

Наиболее труден учет остаточного фона в "урановом" канале $B\bar{v}^{214}$ /. Опыт АГСМ-съемок показывает, что 60-80% скорости счета в "урановом" канале связано с атмосферным радонном. Правильному определению остаточного фона придается очень большое значение, в связи с чем остаточный фон измеряется несколько раз в день над водной поверхностью на рабочей высоте съемки /35/. В некоторых случаях фон регистрируется дополнительным экранированным детектором непосредственно в процессе съемки.

2. Приведение измерений к стандартной высоте, обычно номинальной для используемого летательного аппарата. Из опыта полетов над Канадским щитом для коррекции измерений по высоте используется экспоненциальная зависимость $N_0 = N_H e^{\mu H}$, где μ — эмпирически вычисленный коэффициент ослабления потока гамма-квантов $/0,0052 \text{ м}^{-1}$ для 1,76 мэв и 2,62 мэв и $0,0070 \text{ м}^{-1}$ для 1,46 мэв /.

В последнее время появились способы приведения измерений, основанные на аналитическом продолжении к уровню земли фактически измеренного гамма-поля в предположении двумерного источника излучения. При обработке способом аналитического продолжения предварительно производится коррекция комптоновского рассеяния без какого-либо сглаживания и вычисляется фон каждой составляющей, как среднее значение по маршруту. Отклонения от фона /аномальные данные/ используются для аналитического продолжения к поверхности земли. Затем полученные величины пересчитываются на постоянную высоту /90-150 м/ и "добавляется" фон /средний уровень/ 39/. Недостатком всех способов приведения измерений к единой плоскости является невозможность учета переменной плотности столба воздуха между землей и самолетом

3. Решение системы уравнений:

$$N_K^{ДК} = N_K + \beta N_{Th} + \gamma N_U$$

$$N_U^{ДК} = N_U + \alpha N_{Th} + \delta N_K$$

$$N_{Th}^{ДК} = N_{Th} + \varepsilon N_U$$

где $N_K^{ДК}$, $N_U^{ДК}$, $N_{Th}^{ДК}$ - скорости счета в ДК, N_K , N_U , N_{Th} иско-
мые неизвестные значения составляющих гамма-поля, $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \varepsilon$ -
матричные коэффициенты. Соответствующим подбором энергетических "окон" в большинстве случаев стараются свести систему к треугольной / $\varepsilon = \delta \approx 0$ /. Для спектрометра "Скайвен" получены следующие значения коэффициентов:

$\varepsilon = \delta = 0$; $\alpha = 0,85$; $\beta = 0,33$; $\gamma = 0,56$,
что свидетельствует о весьма высоком энергетическом разрешении детектора, которое удалось получить тщательным подбором 12-ти высококачественных кристаллов и выравниванием усиления ФЭУ /см. выше/.

Для аналоговой коррекции комптоновского рассеивания матричные коэффициенты определяются по приращениям скорости счета в ДК от точечных эталонных источников. Так как спектральный состав излучения точечных источников не соответствует спектру излучения природной среды в реальных условиях измерений, то аналоговая коррекция является приближительной. Основные коэффициенты, используемые при об-

работке данных на ЭВМ, вычисляются по результатам измерений на эталонных участках или площадках /см. ниже/.

Устойчивость решения системы уравнений возрастает в случае системы с треугольной матрицей. Для получения такой матрицы необходимо уменьшение ширины энергетических окон, однако при этом снижается точность измерений.

Рекомендуемая фирмой "Exproganium" оптимальная ширина энергетического окна составляет 15% энергии соответствующего фотопика /40/. Несмотря на простоту такого способа установки "окон", очевидны его недостатки. Жесткая установка энергетических окон не оптимальна в смысле удовлетворения противоречивых требований максимизации скорости счета в ДК для конкретных условий съемки и, с другой стороны, сохранения высокой устойчивости решения уравнений. Стремление использовать фиксированные узкие энергетические "окна" может привести к неоправданному увеличению объема детектора, а, следовательно, к росту стоимости спектрометра. Значительно более объективный и целесообразный способ выбора ширины энергетических "окон" представляется нам по максимуму информации о j - составляющей спектра в соответствующем j - дифференциальном канале при измерении фоновое поля /19/.

4. Преобразование к средним концентрациям радиоэлементов на поверхности земли. Выполнение этого линейного преобразования аргументируется необходимостью получить результаты съемки в "значимых", воспроизводимых единицах. Однако в последнее время возможность выполнения количественной геохимической интерпретации АГСИ-данных путем пересчета скорости счета импульсов в ДК в содержания ставится под сомнение /например, специалистами фирмы "Джеометрикс"/. Такой интерпретации препятствует целый ряд мешающих факторов: 1/ переменная геометрия измерений, 2/ космическая радиация, 3/ влияние рассеянного радона, 4/ вторичная атмосферная радиация.

Для получения коэффициентов пересчета в единицы содержания используются два способа:

1/ Обработанные в соответствии с п.1-3 измерения сопоставляются со средними содержаниями РАЭ на земной поверхности путем многократных измерений над полосой шириной несколько сотен метров /эталонный участок/. Средние содержания РАЭ

на эталонном участке определяются путем статистической обработки результатов анализов проб.

2/ Производятся измерения на бетонных плитах большого размера /7,5x7,5x0,5 м/. Каждая плита содержит однородно распределенные РАЭ с различными соотношениями концентраций между ними. Набор таких эталонировочных плит смонтирован, в частности, в бетонное покрытие аэродрома Айлендс в Оттаве.

Для системы "Скайвен" при высоте 122 м получены следующие значения пересчетных коэффициентов:

1,0%	K	-	соответствует	80 имп/с
$1 \cdot 10^{-4}\%$	U	-	"-"	10 имп/с
$1 \cdot 10^{-4}\%$	Th	-	"-"	5 имп/с

5. Вычисление отношений радиоэлементов.

Отношения U/Th , U/K , Th/K являются в зарубежной практике основными интерпретационными параметрами /см. выше/. Ограниченные возможности метода отношений становятся очевидными, если рассмотреть дисперсию отношения двух случайных величин, которая при их малых значениях /низкоуровневные поля/ резко возрастает и для получения "удовлетворительной статистики" необходимо объединение интервалов измерений до накопления в счетчиках числа не менее, чем в 100 имп. Полученное значение отношения распространяется на весь объединенный временной интервал /35/. Условность выбора минимально значимого числа импульсов и переменный временной интервал измерений ограничивают возможности этого способа.

6. Представление результатов.

Основным способом представления результатов съемки является построение графиков и карт содержаний радиоэлементов и их отношений. Сравнительно недавно заказчику представлялась только карта общей радиоактивности с отдельными точками вычисленных "содержаний" U , Th , K .

При построении карт изолиний на ЭВМ производится интерполяция значений в узлы регулярной сетки, расстояние между которыми последовательно уменьшают. Наиболее широко применяется интерполяция бикубической "сплайн-функцией" по алгоритму Бхаттачарии и Холройда /38/.

Как отмечалось выше, кодовый аэрогамма-спектрометр DiGRS-3001 является одним из лучших зарубежных приборов. Важнейшая отличительная особенность его — универсальность. Фактически прибор является 4-х канальным дифференциальным анализатором спектра с выходом на любой аналоговый регистратор и практически на любой цифровой регистратор. В зависимости от задач число кристаллов NaI(Tl) в детекторе может меняться от 1 до 15. Основные технические данные отмечены в табл. I; блок — схема прибора показана на рис. I.

Амплитудные дискриминаторы /4/ полностью идентичны и взаимозаменяемы. Установка энергетических окон ДК осуществляется потенциометрами нижнего E / и верхнего порогов $E + \Delta E$ /, регулируемых в пределах 0,05–10 в. Возможна работа каждого дискриминатора в дифференциальном и интегральном режиме. Высокая стабильность /0,5 мВ на 1°C / и линейность достигается применением прецизионных многооборотных потенциометров и стандартных стабилизированных источников тока для их питания. Любой дифференциальный канал может использоваться как одноканальный селектор /ОКС/ с энергетическим "окном" порядка 0,03 мэВ. Для стабилизации энергетической шкалы применяется опорный источник Cs^{137} /0,662 мэВ/ или Co^{57} /0,122 мэВ/. Схема стабилизации использует балансный дискриминатор, управляемый высоким напряжением питания ФЭУ.

Счет импульсов, прошедших амплитудные дискриминаторы и формирователи, производится двоично-десятичными измерителями скорости счета. Длительность счетного периода задается схемой управления /рис. I/ и может изменяться через 0,1 с. Цикл счета импульсов управляется внешним синхроимпульсом от магнитометра или доплеровской навигационной системы. По окончании счетного интервала счетчики обнуляются, накопленная информация передается на миниатюрные дисплеи /3-десятичные цифры в каждом канале/ и в ячейки памяти в виде двоично-десятичного параллельного кода. "Мертвое время" счетчиков — 10 μs . Помимо числа сосчитанных импульсов на цифровой выход подается также положение переключателей "коэффи-

циент пересчета" и код переполнения каждого счетчика /более 999 импульсов/. Предусмотрено кодирование положения переключателя "длительность счетного периода".

Блок коррекции комптоновского рассеяния обрабатывает сигнал постоянного напряжения с выхода преобразователей "код-аналог", пропорциональные числу зарегистрированных за счетный интервал импульсов. Коррекция осуществляет решение системы уравнений в виде:

$$\begin{aligned} N_{Th}^{кор} &= N_{Th} - N_{Th}^{фон} \\ N_{u}^{кор} &= (N_u - N_u^{фон}) - \alpha \cdot N_{Th}^{кор} \\ N_k^{кор} &= (N_k - N_k^{фон}) - \beta \cdot N_{Th}^{кор} - \gamma \cdot N_u^{кор} \end{aligned}$$

Коэффициенты α, β, γ регулируются многооборотными потенциометрами, операция вычитания производится термостабилизированными операционными усилителями. На аналоговый регистратор выводятся сигналы с блока коррекции либо непосредственно с преобразователей код-аналог. Аналоговая запись ступенчатая, уровень каждой ступени соответствует числу импульсов, сосчитанных за предшествующий интервал времени.

Запись цифровой информации производится через систему кодовой регистрации "Джеометрикс" G - 704 на стандартную перфоленту /5 или 8-дорожечную/ или на 0,5 -дюймовую магнитную ленту. Спектрометр DiGRS - 3001, оснащенный блоком кодовой регистрации, в 1974 г. впервые был опробован в СССР в комплексе с магнитометром и аэрозлектроразведкой КЕМ и F - 400 /станция "Макфар"/. Система G - 704 позволяет регистрировать до 48 двоично-десятичных знаков /строк/ и до 8 аналоговых каналов с точностью преобразования 0,1%. Так как формат и плотность записи на магнитной ленте соответствуют стандарту IBM, возможен прямой ввод информации в ЭВМ только серии ЕС /"Ряд"/. В настоящий момент обработка информации ведется на ЭВМ М-222, поэтому в качестве основного вида носителя принята 8-дорожечная перфолента. Регистрация измерений производится перфатором "Facit -4070" со скоростью до 75 строк в секунду. Несмотря на меньшее быстродействие и плотность записи чисел по сравнению с магнитофоном, перфолента остается пока наиболее универсальным носителем, обеспечивающим ввод информации в любые ЭВМ, оборудованные стандартным ФСУ.

Важной особенностью системы кодовой регистрации, обеспечивающей стыковку с выходами различных геофизических приборов, является программируемая работа блока считывания цифро-аналоговой информации. При помощи наборных контактов можно изменять последовательность, вид и число знаков кодируемой информации, а также вводить в каждый кадр информации до 4-х служебных индексов. Исходя из требований методики комплексной съемки был разработан формат записи информации на перфоленту /рис. 2/. Кодирование производится с циклом 1 сек. В течение цикла записывается 60 знаков в "длинном" кадре и 46 знаков в "коротком" кадре. Длинный кадр содержит дополнительную информацию о дате аэросъемочного полета, номере маршрута, времени; для сокращения объема измерений он регистрируется один раз за 20 сек. Гамма-спектрометрические данные занимают 9 строк в кадре /три на каждый ДК/.

Результаты полевых испытаний

Кодовый спектрометр DiGRS - 3001 с 4-мя кристаллами, № 3 (ТЭ) размером 152x102 мм в составе комплексной станции "Макфар" использовался при съемке масштаба 1:25 000 в районах Ср.Тимана и Украинского кристаллического щита /УКЩ/. Методика съемки определялась требованиями системы автоматизированной обработки по алгоритму "Аэропоиск-2". В данной работе отражены результаты обработки только аналоговой регистрации.

Как отмечено выше, наиболее близко по типу и основным параметрам спектрометру DiGRS -3001 соответствует отечественный прибор АГС-4к /табл. I/. Поэтому подготовка, настройка спектрометра и собственно съемка выполнялась в соответствии с методикой /16/. После снятия спектров рудных моделей и выполнения фоновой съемки строились "спектрограммы"/рис.3/. "Пороги" и "окна" спектрометра выбирались по принципу информационного максимума и составили /на участках УКЩ/:

ДК "Th"	= 2,24	- 3,03 мэв
ДК "U"	= 1,70	- 1,90 мэв
ДК "K"	= 1,41	- 1,58 мэв

[illegible]

} БУКВЕННЫЕ РАЗРЯДЫ
 — нули
 — четность
 — 8
 — ТРАНСПОРТНАЯ ДОРОЖКА
 — 4
 — 2
 — 1

ПРИМЕЧАНИЕ: 1. ПОЛНЫЙ КАДР - КАЖДЫЙ 21-ый
2 В РЯДОВОМ КАДРЕ ИСКЛЮЧАЮТСЯ СТРОКИ 2-15

Рис.2.

СРЕДНИЙ ТИМАН

$\%N_s^{Th} : \%N_s^{Ra} : \%N_s^K$
ИМП/сек
 $h = 120 \text{ м}$

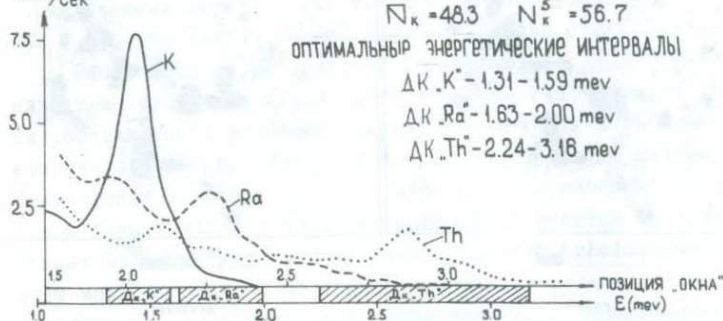
$\bar{N}_{Th} = 43.1$ $N_{Th}^S = 28.9$
 $\bar{N}_{Ra} = 49.6$ $N_{Ra}^S = 28.4$
 $\bar{N}_K = 48.3$ $N_K^S = 56.7$

ОПТИМАЛЬНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ИНТЕРВАЛЫ

$\Delta K_{K''} - 1.31 - 1.59 \text{ mev}$

$\Delta K_{Ra''} - 1.63 - 2.00 \text{ mev}$

$\Delta K_{Th''} - 2.24 - 3.16 \text{ mev}$



$\%N_s^{Th} : \%N_s^{Ra} : \%N_s^K$
 $h = 60 \text{ м}$

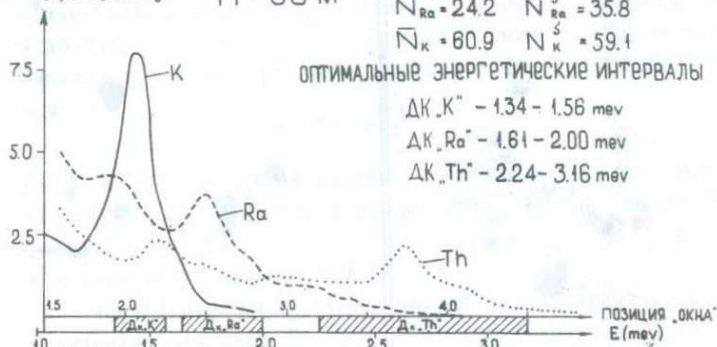
$\bar{N}_{Th} = 15.6$ $N_{Th}^S = 32.6$
 $\bar{N}_{Ra} = 24.2$ $N_{Ra}^S = 35.8$
 $\bar{N}_K = 60.9$ $N_K^S = 59.1$

ОПТИМАЛЬНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ИНТЕРВАЛЫ

$\Delta K_{K''} - 1.34 - 1.56 \text{ mev}$

$\Delta K_{Ra''} - 1.61 - 2.00 \text{ mev}$

$\Delta K_{Th''} - 2.24 - 3.16 \text{ mev}$



$\%N_s^{Th} : \%N_s^{Ra} : \%N_s^K$

УКЩ $h = 60 \text{ м}$

$N_{Th} = 3.4$ $N_{Th}^S = 38.1$
 $\bar{N}_{Ra} = 1.0$ $N_{Ra}^S = 17.0$
 $\bar{N}_K = 8.0$ $N_K^S = 29.0$

ОПТИМАЛЬНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ИН-

$\Delta K_{K''} - 1.41 - 1.58 \text{ mev}$

$\Delta K_{Ra''} - 1.69 - 1.90 \text{ mev}$

$\Delta K_{Th''} - 2.24 - 3.03 \text{ mev}$

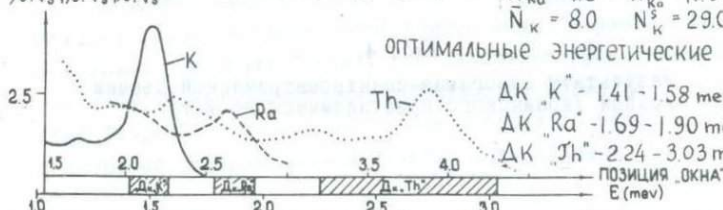


Рис.3. Информация на 8-дорожной перфоленте. Спектрограммы результатов фоновой съемки для 2-х участков.

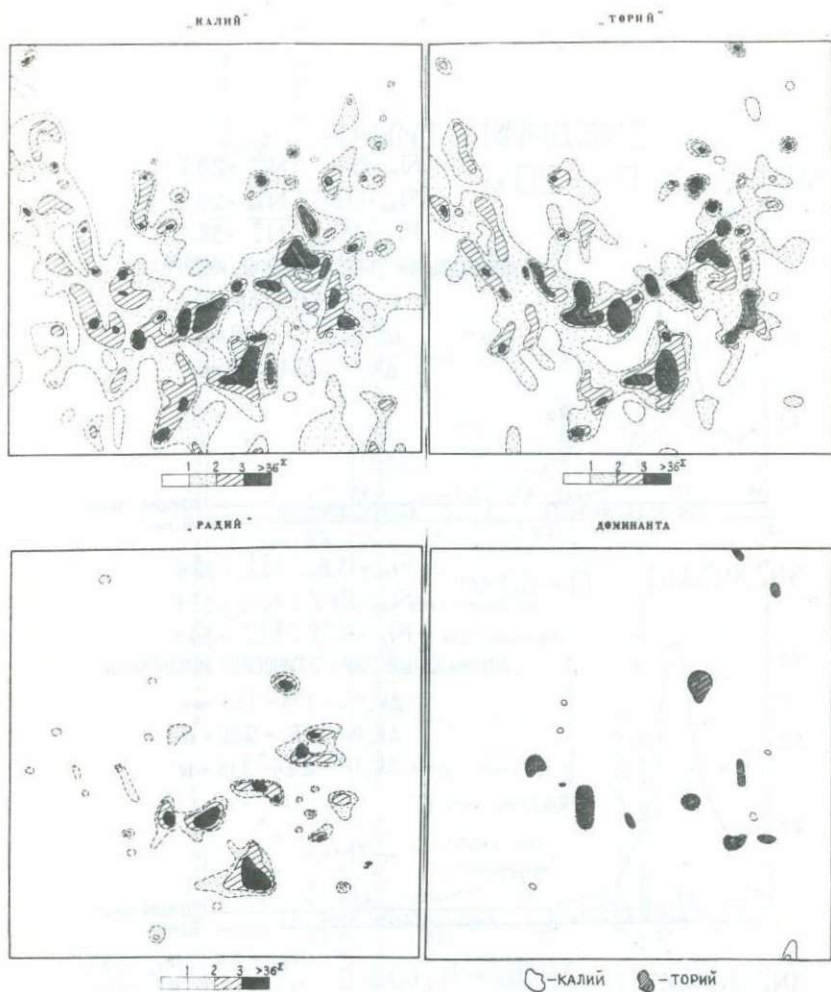


Рис. 4.

Результаты аэрогамма-спектрометрической съемки
/район Украинского кристаллического щита/

Оценка возможностей данного спектрометра для данной фоновой съемки может быть сделана на основе матрицы информации, которая, например, для участка в районе УКЩ имела следующий вид:

0,76	0,08	0
0,21	0,56	0
0,1	0,22	0,45

Нормированный определитель матрицы системы уравнений составил 0,58, что указывает на хорошее качество спектрометра.

Результаты АТСМ-съемки со спектрометром DiGES -3001 иллюстрируются на примере работ в районе УКЩ. Участок съемки располагается в области развития различных интрузивных комплексов протерозойского возраста. В северо-восточном направлении простирается зона верхне-протерозойских гранитов и гранитоидов, в пределах которой отмечаются многочисленные метасоматически измененные породы. С последними связаны месторождение и отдельные проявления редкометальной минерализации, приуроченные к зонам целочного метасоматоза.

На рис.4 приводятся фрагменты карт 3-х составляющих гамма-поля, построенных от фонового уровня в единицах вероятностного сечения σ_j^{Σ} и карта доминант. Параметр доминантности D рассчитывался согласно [14] следующим образом:

$$D = |\bar{K} - \bar{Th}| \cdot e^{\frac{1-x}{2}}$$

где $\bar{K}$ и $\bar{Th}$ - нормализованные отклонения текущих значений калиевой и ториевой составляющих от их средних значений по фоновой выборке.

x - меньшая из величин $\bar{K}$ и $\bar{Th}$.

Анализ имеющихся геологических данных показывает, что повышенные значения Th, Ra, K - составляющих увязываются с метасоматически измененными гранитами и граносиенитами.

Перспективные аномалии на фоне вариаций составляющих гамма-поля четко фиксируются доминациями "тория". Отдельные локальные доминации "калия" соответствуют граносиенитам и гранитам, подвергшимся микроклинизации. Аномалии с доминантой "тория" соответствуют зонам натриевого метасоматоза, с которыми связана редкометальная минерализация.

Литература

1. Аношин Г.Н., Кенежская В.С. Распределение золота в кайнозойских вулканических породах Курило-Камчатской провинции в связи с их петрохимическими особенностями. Геохимия, № 8, 1972.
2. Бабкин П.В., Сидоров А.А. Разв. и охрана недр, № 10, 1972.
3. Беннет О. Поиски гидротермальной минерализации азрогамма-спектрометрическим методом. В сб. Геохимические поиски, Мир, М., 1973.
4. Бростовская В.Г., Гончаров В.И., Еремин Р.А. и др. Материалы по геол. и полезным ископ. Сб СССР, вып. 21, Магадан, 1974.
5. Власов М.Г. Происхождение зонального строения Тихоокеанского рудного пояса /на примере Курило-Камчатской дуги/. В сб. Вопросы металлогении, Международный геол. конгресс, XXII сессия, Недр, 1965.
6. Высокоостровская Е.Б., Шахнович Ю.Л., Малаших В.А., Бобрицкий Д.П. Роль калия при процессах низкотемпературного гидротермального метасоматизма /на примере низкотемпературных близповерхностных м-ний урана/. Радиометрия и ядерная геофизика, вып. 10, Л., Недр, 1972.
7. Дженсер Г. Факторы, влияющие на разрешающую способность и точность аэрогеофизических съемок. Лекция на междунар. семинаре ООН по нов[ым] методам поисков полезн. ископ. М., июль, 1967.
8. Керр П.Ф. Месторождения урана и тория. В сб. Геология атомных сырьевых материалов, М., 1956.
9. Коптев-Дворников В.С. и др. О металлогенической специализации комплексов. В сб. Вопросы металлогении, Междунар. геолог. конгресс, XXII сессия, Недр, 1965.
10. Кузнецов П.Г., Смирнов Г.В. Кибернетика и химия, Просвещение, М., 1966.
11. Мамиконов А.Г. Управление и информация, Наука М., 1975.
12. Островский Э.Я. Антагонизм радиоактивных элементов в полях околорудных изменений и его использование в

аэрогамма-спектрометрии. Советская геология, № 10, 1973.

13. Островский Э.Я. Применение аэрогамма-спектрометра при поисках месторождений редких металлов. Аэросъемка и ее применение, Наука, Л., 1967.

14. Островский Э.Я. Радиоактивные аномалии как индикаторы рудного процесса. ДАН СССР, т.221, вып.1, 1975.

15. Островский Э.Я. Целевая функция АГСМ-метода в системе геологических исследований. В сб. Применение кодовых аэрогамма-спектрометров и универсальных ЭВМ при поисках рудных месторождений, МГ СССР, М., 1975.

16. Островский Э.Я., Блащинский В.С. Методические указания по аэрогамма-спектрометрической съемке с кодовым прибором АГС-4К, МГ СССР, М., 1974.

17. Островский Э.Я., Блащинский В.С. Эффективность оглаживающих фильтров при обработке аэрогамма-спектрометрических измерений. В сб. Математические методы в геологии, ВИС, М., 1974.

18. Островский Э.Я., Блащинский В.С., Артамонов М.А. и др. Применение аэрогамма-спектрометра АГС-5К и алгоритмов "Аэропоиск" в опытно-методических работах. Тезисы докл. УИ Всес. геофизич. конф., г. Львов, 1972.

19. Островский Э.Я., Блащинский В.С., Калмыков Д.З. Информация - мера оптимальной настройки аэрогамма-спектрометра. В сб. Математические методы в геологии, ВИС, М. 1974.

20. Островский Э.Я., Блащинский В.С., Персиц Ф.М. и др. Автоматизированная система обработки данных АГСМ-съемок - "Аэропоиск-2". В сб. Применение кодовых аэрогамма-спектрометров и универсальных ЭВМ при поисках руд м-ний, МГ СССР, М., 1975.

21. Островский Э.Я., Портнов А.М., Драбкин И.Е. Поиски близповерхностных месторождений золота в эффузивах методом аэрогамма-спектрометрии. Геология рудных месторождений, № 3, 1970.

22. Поляков А.И. Геохимия тория в щелочных породах Кольского п-ва, М., Наука, 1970.

23. Портнов А.М., Вельяксов Ф.Ф. Факторы локализации золото-серебряного оруденения в структуре Карамкенского ме-

сторожения /Охотско-Чукотский вулканогенный пояс/, ДАН СССР, т.202, № 3, 1972.

24. Портнов А.М., Островский Э.Я. Поведение щелочей и радиоактивных элементов в процессе региональной гранитизации пород кейвской серии /Кольский п-ов/. Изв.АН СССР, сер.геол. № 5, 1971.

25. Портнов А.М., Островский Э.Я., Колотов Б.А. Применение азрогамма-спектрометрии и гидрогеохимии для поисков близ-поверхностных золоторудных месторождений. Разведка и охрана недр, № II, 1971.

26. Савинский И.Д., Грудев А.П., Петрова А.А. и др. Применение математических методов и ЭВМ при оконтуривании руд. В сб. Математические методы в геологии, ВИМС, М., 1974.

27. Савинский И.Д., Островский Э.Я., Блащинский В.С. Сглаживание профильных радиометрических наблюдений при высоком уровне флуктуационных помех. Атомная энергия, т.35, № 3, 1973.

28. Смыслов А.А. Уран и торий в земной коре, Недр, 1974.

29. Фаворская и др. Глобальные закономерности размещения крупных рудных месторождений, Недр, 1974.

30. Шер С.Д. Металлогения золота. М., Недр, 1974.

30а. Шилин Н.Д. Золото в породах Центр.Качатки, Изв. АН СССР, сер.геол., 1968, № II.

31. Cook B., Duval J. and Adams J.A.S. Progress in the calibration of airborne gamma-ray spectrometers for geochemical exploration. CIM Special vol. 11, Proc. Third International Geochemical Exploration Symposium, Toronto. 1971.

32. Darnley A.G. and Fleet M. Evaluation of airborne gamma-ray spectrometry in the Bancroft and Elliot Lake areas of Ontario, Canada, Proc. Fifth Symposium on Remote Sensing of Environment Univ. of Michigan, Ann Arbor, 1968.

33. Darnley A.G. Airborne gamma-ray spectrometry; CIM Trans, vol. LXXIII, 1970.

34. Darnley A.G. Airborne gamma-ray survey techniques, Nato advanced study institute, London, 21.9 - 2.10, 1971.

35. Darnley A.G. and Grasty R.L. Mapping from the air by gamma-ray Spectrometry; CIM Special Vol. 11, Proc. Third

International Geochemical Exploration Symposium, Toronto, 1971.

36. Darnley A.G., Grasty R.L. and Charbonneau B.W. A radiometric profile across part of the Canadian Shield. Geol. Surv. Can, Paper 70-46, 1971.

37. Frondel C. Systematic mineralogy of uranium and thorium; U.S.G.S.Bulletin, 1064, 1958.

38. Holroyd M.T. and Bhattacharyya B.K. Automatic Contouring of geophysical data using bicubic spline interpolation, Geol. Surv. Can., Paper 70-55, 1970.

39. "Geometrics " Compton scatter and altitude correction of gamma-ray spectrometry data Technical report N 4, 1973,

40. "Exploranium". Gamma-ray spectrometer DiGRS- 3001 Technical annual, 1973.

Заказ № 52/75. Л-60624. 19/II-76г. Объем 4,2 уч.-изд.л.
Тираж 500. Цена 29 коп.

Ротапринт ОЭП ВИМСа

Цена 29 коп.

1654