

УДК 550.835.232, 550.84.094.2, 550.8.053

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ МНОГОМЕРНОЙ СТАТИСТИКИ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ НАЗЕМНОЙ ГАММА-СПЕКТРОМЕТРИИ ПРИ ПОИСКАХ ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЗОЛОТА

Соболев Игорь Станиславович<sup>1</sup>,  
geolsob@yandex.ru

Орехов Александр Николаевич<sup>1</sup>,  
orekhovan@mail.tomsknet.ru

Соболева Надежда Петровна<sup>1</sup>,  
sobnadi@yandex.ru

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, 634030, г. Томск, пр. Ленина, 30.

**Актуальность** работы определяется необходимостью улучшения информативности гамма-спектрометрических исследований в условиях невысокой контрастности радиогеохимических аномалий. Крупные и средние по запасам гидротермальные месторождения золота в освоенных районах золотодобычи уже обнаружены. Поиск небольших слабо проявленных в геохимических полях золоторудных объектов требует использования дополнительных процедур обработки радиогеохимических данных для выделения «полезного» сигнала от гидротермально измененных пород. Усиление контрастности гамма-спектрометрических эффектов от продуктов деятельности флюидогенных систем возможно за счет анализа параметров локальной вариативности фонового содержания радионуклидов. Сложность решения этой задачи обусловлена одновременным влиянием на особенности фоновой флуктуации радиогеохимического поля группы сильных природных факторов. Основными из этих факторов являются: минеральный состав горных пород и ландшафтно-морфологическое строение территорий. Для определения специализации радиоактивных аномалий кроме информации по содержанию естественных радиоактивных элементов часто привлекают расчетные отношения:  $K/Th$ ,  $U/Th$  и  $U/K$ . Появляется необходимость их совместного анализа, который можно упростить с помощью статистических способов выделения наиболее информативных признаков и сокращения их количества.

**Цель работы:** апробация алгоритма статистической обработки данных крупномасштабных наземных гамма-спектрометрических съемок на трех гидротермальных золоторудных объектах.

**Методы исследования:** наземные гамма-спектрометрические измерения концентраций  $^{40}K$ ,  $^{238}U$  ( $^{226}Ra$ ),  $^{232}Th$ ; статистическая обработка данных с использованием кластерного и многофакторного дисперсионного анализа методом главных компонент.

**Результаты.** Проведена оценка и учет особенностей фоновых колебаний содержаний естественных радионуклидов. Путем многопризнакового статистического анализа значений коэффициентов концентраций естественных радиоактивных элементов и их индикаторных отношений определена радиогеохимическая специализация гамма-спектрометрических аномалий. Оценена связь радиоактивных аномалий с гидротермально-метасоматическими околорудными изменениями.

### Ключевые слова:

Гамма-спектрометрия, многомерная статистика, околорудные гидротермалиты, радиогеохимическая специализация, гидротермальные месторождения золота.

### Введение

Радиогеохимические характеристики продуктов гидротермально-метасоматической деятельности флюидогенных систем позволяют использовать полевые гамма-методы регистрации радиоактивности при поисках рудных месторождений полезных ископаемых и залежей углеводородов. Дифференциация радиоактивных элементов в минеральном веществе земной коры происходит на всех уровнях организации: минералах, горных породах, геологических формациях, структурно-формационных комплексах и отдельных слоях земной коры. При этом, несмотря на существенную разницу в уровнях накопления естественных радионуклидов ( $^{40}K$ ,  $^{238}U$ ,  $^{232}Th$ ), для различных неизмененных геологических образований значения отношений  $K/Th$ ,  $U/Th$  ( $Th/U$ ),  $U/K$  варьируют в сравнительно узких диапазонах [1, 2]. Иное распределение радионуклидов происходит при формировании метасоматической зональности, где

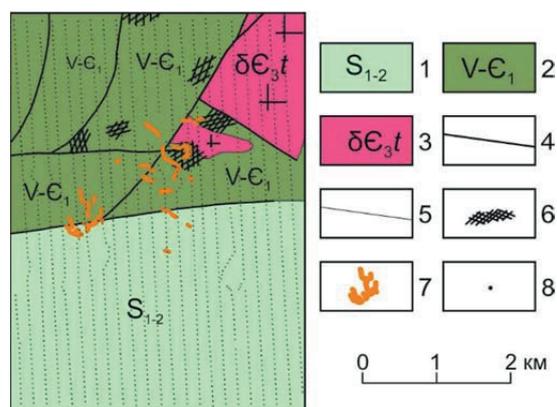
особенности их концентрирования определяются физико-химическими параметрами гидротермальной системы и химическим составом флюидов. Процесс эволюции флюидогенных систем рудных месторождений в радиогеохимическом аспекте выражается в антагонизме поведения естественных радиоактивных элементов (ЕРЭ), контрастно проявленном в паре калия и тория. Руды халькофильных металлов ассоциируют с продуктами щелочного калиевого метасоматоза. Гидротермальная минерализация ниобия, тантала, редкоземельных и некоторых других лиофильных элементов сопровождается образованием минералов-концентратов тория [3].

Для выявления областей развития гидротермально-измененных пород гамма-спектрометрическим методом используют уже упомянутые индикаторные отношения –  $K/Th$ ,  $U/Th$  и  $U/K$  [4, 5]. Поиск наложенных изменений также осуществляется по радиогеохимическим показателям, кото-

рые одновременно учитывают особенности концентрирования всех трех радионуклидов. Известны: способ индикации перспективных аномалий относительно трехмерного (торий-уран-калиевого) вектора фонового распределения; показатели аномального отклонения содержаний радиоактивных элементов (F-параметр и DRAD), рассчитываемые относительно содержания тория [6–8]. Данные радиогеохимические индексы удобнее анализировать, чем индивидуальные отношения в парах радионуклидов, но два последних в первую очередь направлены на оценку калий-урановой аномальной составляющей, затеняя информацию об особенностях распределения тория. Визуализацию параметров баланса концентраций ЕРЭ часто представляют в виде карт смеси цветов: красного-зеленого-синего. Значение содержания радионуклида соответствует цифровому коду «интенсивности» одного из трех цветов, а итоговая окраска для каждой точки измерений определяется ее положением в поле треугольной диаграммы аддитивной цветовой палитры RGB [9]. Главным недостатком такого способа представления гамма-спектрометрических данных является сугубо качественный характер получаемой информации. Устойчивым радиогеохимическим признаком гидротермальных и гидротермальных рудных месторождений является нарушение корреляционных связей ЕРЭ [10]. Особенности корреляционного анализа – это слабая зависимость результатов от абсолютных значений исходных данных и низкая чувствительность к погрешностям их увязки. Путем варьирования размера статистического окна можно минимизировать влияние ландшафтно-геоморфологических и других природных факторов. Однако по причине отсутствия четких алгоритмов определения оптимального размера статистической палетки ее параметры подбираются путем множественного перебора, а результат сильно зависит от опыта интерпретатора. Из-за особенностей алгоритма обсчета в статистическом окне границы аномальных объектов искажаются, к тому же нередко возникают ложные аномальные краевые эффекты.

Анализ гамма-спектрометрических данных в подавляющем большинстве случаев осуществляется без учета флуктуации фоновой компоненты содержания естественных радионуклидов. Однако значения индикаторных отношений зависят от ряда геологических и ландшафтных факторов, не связанных с гидротермальными изменениями. К ним относятся: тип пород и их возраст; уровень эрозионного среза магматических комплексов; рельеф и сопряженные с ним ландшафты и др. Как следствие, диапазоны изменения значений отношений концентраций радиоактивных элементов в продуктах гидротермальной деятельности и в неизмененных горных породах могут совпадать. В процессе решения поисковых геохимических задач проблему определения фоновых значений концентраций анализируемых компонентов осуществляют с привлечением результатов ландшафтно-

геохимических исследований. Нередко возникают ситуации, когда нет необходимого минимума информации для составления ландшафтно-геохимических карт. Частично эту проблему можно решить, привлекая данные дистанционного зондирования и топографии для создания геоморфологических и эрозионных моделей территории [11]. Однако процедуры, сопутствующие реализации этого подхода, достаточно трудоемки, а также требуют специальных навыков и программного обеспечения для работы с космоснимками.



**Рис. 1.** Схема геологического строения золоторудного месторождения Тардан (по К.К. Кильчичакову, 1977): 1) ранний – поздний силур: песчаники красноцветные, гравелиты, конгломераты, прослои известняков; 2) венд – ранний кембрий: доломиты, известняки, известковистые конгломераты; 3) гранитоиды Таннуольского комплекса; 4) разломы; 5) геологические границы; 6) скарны; 7) золоторудные тела; 8) точки гамма-спектрометрических измерений

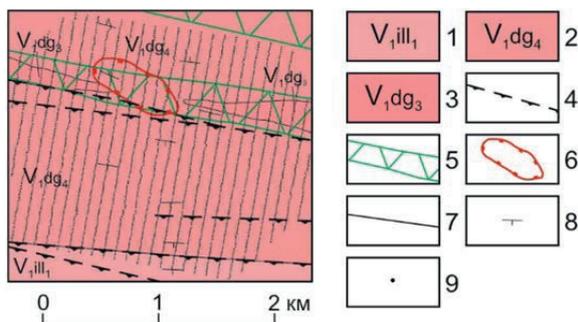
**Fig. 1.** Schematic geological map of the Tardan gold ore deposit (adapted from K.K. Kilchichakov, 1977): 1) early-late Silurian: redbed sandstones, gravelstones, conglomerates, interbeds of limestone; 2) Vendian – early Cambrian: dolomites, limestones, calcareous conglomerates; 3) granitoids of the Tannu-Ola complex; 4) faults; 5) geological boundary; 6) skarns; 7) gold ore bodies; 8) point of gamma-ray spectrometry measurements

### Геологическое строение участков исследований

Месторождение золота Тардан

Скарново-золоторудное месторождение Тардан располагается на юге Сибири в 60 км на ВСВ от г. Кызыла, столицы Республики Тыва. Месторождение принадлежит Байсютскому золотоносному району, границы которого преимущественно совпадают с крупным гранитоидным плутоном таннуольского комплекса. Магматический комплекс прорывает позднерифейско-нижнекембрийские вулканогенно-осадочные и карбонатные толщи. Геологическое строение месторождения представлено терригенными породами, мраморизованными известняками и кислыми вулканитами, слагающими крупную антиклинальную складку (рис. 1). Рудное поле месторождения занимает площадь около 1 км<sup>2</sup>, в пределах которой выявлено и разведано 14 рудных тел. Среди скарнов и ги-

дротермальных пород выделяется два типа метасоматических тел: контактовый и трещинный. Трещинный тип скарновых залежей является наиболее продуктивным. Размещение золото-медно-сульфидной минерализации в скарнах контролируется зонами интенсивной трещиноватости и разрывов северо-восточного простирания. По особенностям минеральных ассоциаций выделяют кальцит-золото-медносульфидный прожилково-вкрапленный и кварцево-золоторудный жильно-прожилковый типы руд. Сульфиды, золото и минералы околорудных метасоматитов (кварц, кальцит, доломит, хлорит, серицит, серпентин, анкерит) формировались сближено во времени на послемагматическом этапе [12].



**Рис. 2.** Схема геологического строения золотого рудопроявления Обручева (по В.М. Аксенову, 1981): 1–3) ранний венд: иллигирская свита (1): флишоидное и тонкое переслаивание метапесчаников и филлитов; догалдынская свита: четвертая подсвита (2): метапесчаники; третья подсвита (3): переслаивание метапесчаников, карбонат-углеродистых метаалевролитов и филлитов; 4) разломы; 5) зоны прожилково-вкрапленной сульфидной и железисто-магнезиально-карбонатной минерализации; 6) кварцево-жильные зоны; 7) геологические границы; 8) элементы залегания; 9) точки гамма-спектрометрических измерений

**Fig. 2.** Schematic geological map of the Obruchev gold ore manifestation (adapted from V.M. Aksenov, 1981): 1–3) early Vendian: illigirskaya suite (1): flushoid and thin interbedded metasandstones and phyllites; dogaldynskaya suite: fourth member (2): metasandstones; third member (3): interbedded metasandstones, carbonate-carbonaceous metasilstone and phyllites; 4) faults; 5) zones of streaky-impregnated sulfides and siderite-magnesium carbonate mineralization; 6) quartz-veinose zone; 7) geological boundary; 8) attitude; 9) point of gamma-ray spectrometry measurements

#### Рудопроявление золота Обручева

Золоторудное проявление Обручева находится в 38 км на север от г. Бодайбо в Иркутской области и относится к Васильевскому рудному полю Бодайбинского золоторудного района. Золоторудная минерализация представлена кварц-сульфидным прожилково-вкрапленным и кварц-жильным типами в черносланцевой формации. Рудопроявление Обручева связано с кварц-жильной зоной, расположенной в сводовой части антиклинальной складки IV-го порядка (рис. 2). В геологическом разрезе преобладают мелкозернистые метапесчаники.

В нижней части отложений третьей подсвиты догалдынской свиты установлена пачка ритмичного переслаивания метапесчаников, карбонат-углеродистых метаалевролитов и сланцев мощностью до 45 м, в которой сформировалась зона рассланцевания. На севере участок рудопроявления граничит с Успенским взбросом, сопровождающимся зонами смятия и повышенной трещиноватостью пород. С влиянием этого разлома связаны дорудные гидротермальные изменения пород, представленные зонами сульфидной и железисто-магнезиально-карбонатной минерализации в углеродистых толщах. Формирование золоторудной минерализации на месторождениях Бодайбинского золоторудного района осуществлялось на заключительной стадии главного этапа складкообразования. В этот период происходило подновление разрывных структур, возникновение систем трещин. По этим каналам поступали новые порции золотоносного раствора с образованием в наиболее проницаемых частях породного комплекса рудных столбов. Гидротермально-метасоматические изменения рудного этапа наиболее крупного месторождения Бодайбинского золоторудного района – Сухой Лог – относят к березит-пропилитовой формации [13].

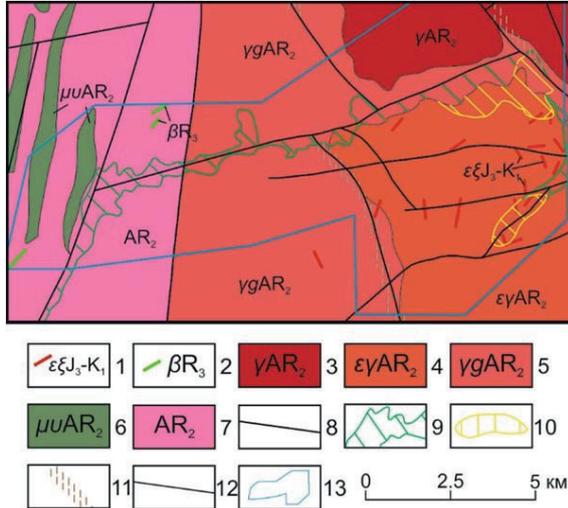
Поисковый участок (местонахождение конфиденциально)

Участок территориально принадлежит Чаро-Олекминскому блоку Алдано-Станового щита и тяготеет в структурном отношении к Угуйской грабен-синклинали. В геологическом строении принимает участие толща кристаллических амфиболовых сланцев, которая по разрывному нарушению на востоке граничит с магматическими образованиями трех плутонических комплексов, преимущественно гранитоидного состава (рис. 3). Собственно глубокометаморфизованные сланцы прорваны небольшими интрузивами и дайкообразными телами основного и среднего состава. На мезозойском этапе тектоно-магматической активизации внедрялись субпластовые тела и дайки щелочного и субщелочного состава, а также шло становление гидротермально-метасоматических образований, преимущественно калиевого петрохимического профиля – гумбеитов [14]. В вещественном отношении потенциально золоторудные зоны локализованы в интенсивно гумбеитизированных (адуляризированных) породах, как в пределах плутонических комплексов, так и кристаллических сланцев. Гидротермально-метасоматические образования в зоне гипергенеза сильно изменены, вплоть до полного окисления первичной сульфидной минерализации.

#### Методика проведения гамма-спектрометрической съемки

Наземная гамма-спектрометрическая съемка проводилась по сети: месторождение Тардан – 200×40 м (рис. 1); рудопроявление Обручева и Поисковый участок – 100×20 м (рис. 2, 3). Определение концентраций радионуклидов ( $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$  (по

$^{226}\text{Ra}$ ),  $^{232}\text{Th}$ ) осуществлялось полевыми гамма-спектрометрами различных марок и модификаций: месторождение Тардан – РКП-305; рудопроявление Обручева – РКП-305М; Поисковый участок – РКП-305М и МКСП-01 «РАДЭК».



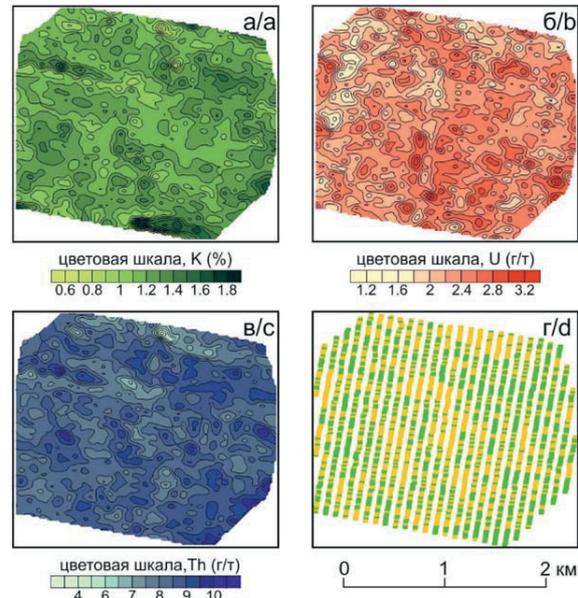
**Рис. 3.** Схема геологического строения Поискового участка (по И.О. Кремеру, 2017): 1) поздняя юра – ранний мел: дайки и силлы сиенитов, бостонитов; 2) поздний рифей: малые тела и дайки диабазов, долеритов, габбро-долеритов; 3–7) поздний архей: граниты микроклиновые, биотитовые, лейкократовые (3); граниты, гранодиориты, лейкограниты (4); гранитогнейсы, плагиогранитогнейсы, лейкогранитогнейсы, гнейсограниты (5); небольшие массивы, линзовидные и дайкообразные тела метагабброидов и метадiorитов (6); кристаллические сланцы биотит-амфиболовые, амфиболовые, пироксен-амфиболовые (7); 8) разломы; 9–10) метасоматиты: кварц-микроклиновые (9); лимонит-кварц-полевошпатовые (10); 11) динамометаморфиты: бластокатаклазиты и бластомилониты, диафториты эпидот-актинолитовые, сланцы хлоритовые, серицит-хлорит-кварцевые, кварц-альбит-серицитовые; 12) геологические границы; 13) контур участка гамма-спектрометрической съемки

**Fig. 3.** Schematic geological map of the Poiskovy study area (adapted from I.O. Kremer, 2017): 1) late Jurassic – early Cretaceous: dikes and sills of syenite and bostonite; 2) late Riphean: smaller bodies and dikes of diabase, dolerite and gabbro-dolerite; 3–7) late Archean: microcline, biotite and leucocratic granites (3); granite, granodiorite and leucocratic granite (4); granite gneiss; plagioclase granite gneiss; leucocratic granite gneiss; gneissose granite (5); small massifs, phacoidal bodies, dikes of metagabbroid and metadiorite (6); biotite-amphibole, amphibole and pyroxene-amphibole crystalline schist's (7); 8) faults; 9–10) hydrothermal alterations: quartz-microcline (9), limonite-quartz-feldspathic (10); 11) dynamic metamorphism: blastocataclasite and blastomylonite, epidote-actinolite diaphorite, chlorite, sericite-chlorite-quartz and quartz-albite-sericite schist's; 12) geological boundary; 13) contour of gamma-ray spectrometry survey

### Результаты

Специфика местных природных условий оказала существенное влияние на различия в особенностях концентрирования радиоактивных элементов

между участками съемки. Монотонное, в основном представленное метапесчаниками, литологическое строение рудопроявления Обручева определило наиболее низкие коэффициенты вариации ЕРЭ (табл. 1) и сравнительно однородное строение полей их концентраций (рис. 4, а–в). В пределах месторождения Тардан и Поискового участка встречаются геологические блоки, заметно отличающиеся по радиогеохимическим особенностям слагающих их пород, что выразилось в относительно высокой степени дифференцирования радиоактивного поля (рис. 5, а–в; 6, а–в). Помимо геологического строения приповерхностного горизонта Поискового участка и рудопроявления Обручева, на особенности полученных результатов измерений ощутимое воздействие оказал характер растительности в пределах наиболее гористых частей территорий. Этот фактор выразился в заметном экранировании гамма-излучения горных пород в ареалах развития моховой подстилки на склонах с северной экспозицией.



**Рис. 4.** Распределение калия (а), урана (б), тория (в) и схематическая карта радиогеохимических квазиоднородных участков (г) на рудопроявлении Обручева

**Fig. 4.** Potassium (a), uranium (b), thorium (c) spatial distribution and schematic map of radiometric quasi-homogeneous plots (d) of the Obryuchev ore manifestation

Задача определения пространственной изменчивости фоновых концентраций радионуклидов решалась с помощью кластер-анализа. Различные способы кластеризации гамма-спектрометрической информации в основном используют с целью геологического и почвенного картирования [15]. Однако минеральный состав коренного субстрата и сформированных по нему почв является сильной, но не исключительной природной причиной, определяющей фоновые параметры концентрирования химических элементов. На результирующую классификацию оказывают влияние все природные и искусственные факторы, в т. ч. такие существен-

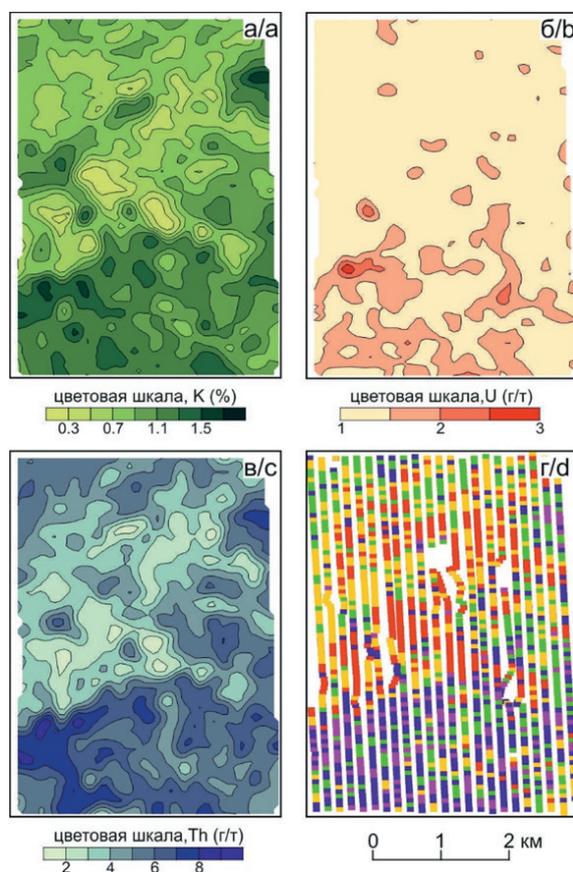
ные, как ландшафтно-морфологические. Таким образом, путем кластеризации геохимических данных удается получить пространственную математическую модель, по смысловой нагрузке близкую к ландшафтно-геохимической карте, и на ее основе учитывать особенности флуктуации местного геохимического фона [16, 17]. Кластер-анализ гамма-спектрометрической информации осуществлялся методом К-среднего по стандартизированным значениям концентраций ЕРЭ. Итоговое количество принимаемых при расчете кластеров определялось путем множественного перебора получаемых результатов. Оптимальным считался тот случай, когда на схеме квазиоднородных участков находили отражение относительно крупные по площади области с ярко выраженными радиогеохимическими характеристиками. Одновременно не происходило появления большого количества локальных неоднородностей, которые могут проявлять зоны околорудных гидротермальных изменений.

**Таблица 1.** Статистические характеристики распределения ЕРЭ  
**Table 1.** NREs distribution statistics

Площадь исследования Study areas	Среднее Mean	Медиана Median	Мин. - Макс. Min-Max	Коэф. вариации Variation coefficient (%)
Тардан/Tardan (N=1769): K, % U, г/т (ppm) Th, г/т (ppm)	0,9 1 5	0,9 1 5	0,1–2,2 1–3 1–11	39 38 39
Обручева/Obruchev (N=2662): K, % U, г/т (ppm) Th, г/т (ppm)	1,2 2,3 8,4	1,2 2,3 8,3	0,4–2,2 0,7–4,0 3,3–13,0	14 10 11
Поисковый/Poiskovy (N=20244): K, % U, г/т (ppm) Th, г/т (ppm)	3,4 2,9 14,2	3,1 2,6 11,0	0,7–13,4 0,9–15,5 4,1–70,8	53 41 63

Дифференциация радиогеохимического фона месторождения Тардан осуществлялась по пяти кластерам. В результате с некоторыми вариациями, обусловленными степенью обогащенности коренных отложений и местными ландшафтами, обособились существенно карбонатные слабо-радиоактивные отложения венда и нижнего кембрия, более радиоактивные, преимущественно терригенные, силурийские отложения и гранитоиды таннуольского комплекса (рис. 5, з). Для уменьшения влияния ландшафтно-морфологических факторов на слабо изменчивые поля содержаний ЕРЭ рудопроявления Обручева использовалось минимально возможное количество кластеров (рис. 4, з). Поисковый участок тремя группами статистической классификации разделен на восточную часть, сложенную высоко-радиоактивными гранитами, и западную область развития гранитогнейсов и кристаллических сланцев, для которых ха-

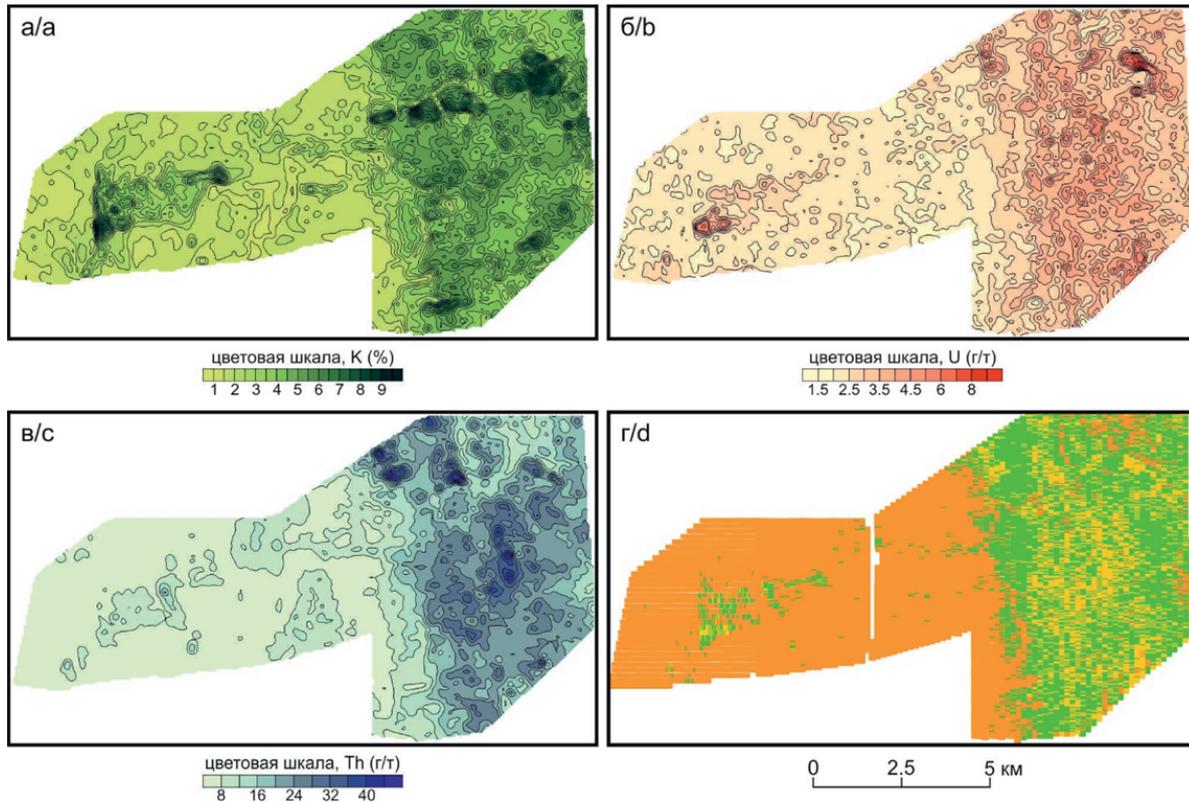
рактерна значительно пониженная гамма-активность (рис. 6, з). Более дробная дифференциация радиогеохимического поля в пространственном распределении точек трех кластеров на востоке территории обусловлена сильно расчлененным рельефом с выраженной ландшафтной зональностью. Крупная неоднородность высокого содержания ЕРЭ в западном секторе не находит отражения на геологической карте и по нашим предположениям связана с наложенными процессами гранитизации в районе узла пересечения двух крупных разломов. Ослабление вклада фоновых колебаний в распределение радиоактивных элементов производилось путем перехода к безразмерным величинам – коэффициентам концентрации (kk). Для этого содержания радионуклидов каждой точки измерений нормировались по медианному значению, рассчитанному для выборок тех кластеров, к которым эти точки были определены.



**Рис. 5.** Распределение калия (а), урана (б), тория (в) и схема радиогеохимических квазиоднородных участков (г) на месторождении Тардан

**Fig. 5.** Potassium (a), uranium (b), thorium (c) spatial distribution and schematic map of radiometric quasihomogeneous plots (d) of the Tardan deposit

Дифференциация радиогеохимического фона месторождения Тардан осуществлялась по пяти кластерам. В результате с некоторыми вариациями, обусловленными степенью обогащенности коренных отложений и местными ландшафтами,



**Рис. 6.** Распределение калия (а), урана (б), тория (в) и схема радиогеохимических квазиоднородных участков (г) на Поисковом участке

**Fig. 6.** Potassium (a), uranium (b), thorium (c) spatial distribution and schematic map of radiometric quasihomogeneous plots (d) of the Poiskovy study area

обособились существенно карбонатные слаборадиоактивные отложения венда и нижнего кембрия, более радиоактивные, преимущественно терригенные, силурийские отложения и гранитоиды таннуольского комплекса (рис. 5, з). Для уменьшения влияния ландшафтно-морфологических факторов на слабо изменчивые поля содержаний ЕРЭ рудопроявления Обручева использовалось минимально возможное количество кластеров (рис. 4, з). Поисковый участок тремя группами статистической классификации разделился на восточную часть, сложенную высокордиоактивными гранитами, и западную область развития гранитогнейсов и кристаллических сланцев, для которых характерна значительно пониженная гамма-активность (рис. 6, з). Более дробная дифференциация радиогеохимического поля в пространственном распределении точек трех кластеров на востоке территории обусловлена сильно расчлененным рельефом с выраженной ландшафтной зональностью. Крупная неоднородность высокого содержания ЕРЭ в западном секторе не находит отражения на геологической карте и по нашим предположениям связана с наложенными процессами гранитизации в районе узла пересечения двух крупных разломов. Ослабление вклада фоновых колебаний в распределение радиоактивных элементов производи-

лось путем перехода к безразмерным величинам – коэффициентам концентрации (kk). Для этого содержания радионуклидов каждой точки измерений нормировались по медианному значению, рассчитанному для выборок тех кластеров, к которым эти точки были определены.

С целью определения радиогеохимической специализации аномалий применялся факторный дисперсионный анализ методом главных компонент. Известны примеры совместного анализа результатов гамма-спектрометрических измерений концентраций ЕРЭ с другими геофизическими, геохимическими и геологическими данными [15, 18]. В нашем случае в качестве входных признаков кроме коэффициентов концентраций радионуклидов привлекались отношения:  $kkK/kkTh$ ,  $kkU/kkTh$  и  $kkU/kkK$ . Во всех трех случаях было установлено, что объясненная дисперсия радиогеохимического поля описывается двумя главными компонентами (табл. 2).

#### Обсуждение результатов

Кластер-анализ не является идеальным методом для оценки региональной составляющей изменчивости радиогеохимического поля. Однако, в сравнении с фильтрацией данных в скользящих статистических окнах и аппроксимации поверхно-

сти тренда полиномами, кластер-анализ обладает рядом преимуществ. В частности, не возникает ложной взаимозависимости между отдельными членами, пригоден для описания прерывистых геологических объектов. К тому же, доверительные вероятности отнесения точек к кластерам выше, чем у получаемых значений «скользящих средних», особенно при реализации второго способа с небольшим числом наблюдений в скользящем окне. Приведение полей концентраций ЕРЭ к одному уровню фона позволяет при дальнейшем анализе в большей мере сосредоточиться на аномальной составляющей, что особенно важно в условиях слабого проявления «полезного» сигнала.

**Таблица 2.** Вращаемые факторные нагрузки в двухфакторных моделях радиогеохимического поля

**Table 2.** Rotated factor loadings in two-factors models of radiometric spatial patterns

Признак Indicator	Тардан Tardan		Обручева Obruchev		Поисковый Poiskovy	
	ГК-1 PC-1	ГК-2 PC-2	ГК-1 PC-1	ГК-2 PC-2	ГК-1 PC-1	ГК-2 PC-2
kkK	0,82	-0,53	0,92	0,36	0,61	-0,75
kkU	0,10	0,97	0,03	0,03	0,37	0,89
kkTh	-0,88	-0,33	0,01	0,98	-0,96	-0,13
kkK/kkTh	0,98	-0,04	0,92	-0,39	0,92	-0,32
kkU/kkTh	0,62	0,75	0,02	-0,42	0,83	0,49
kkU/kkK	-0,30	0,90	-0,49	-0,18	-0,06	0,99
%, от общей дисперсии Total variance	50,2	44,4	51,5	30,0	49,5	46,4

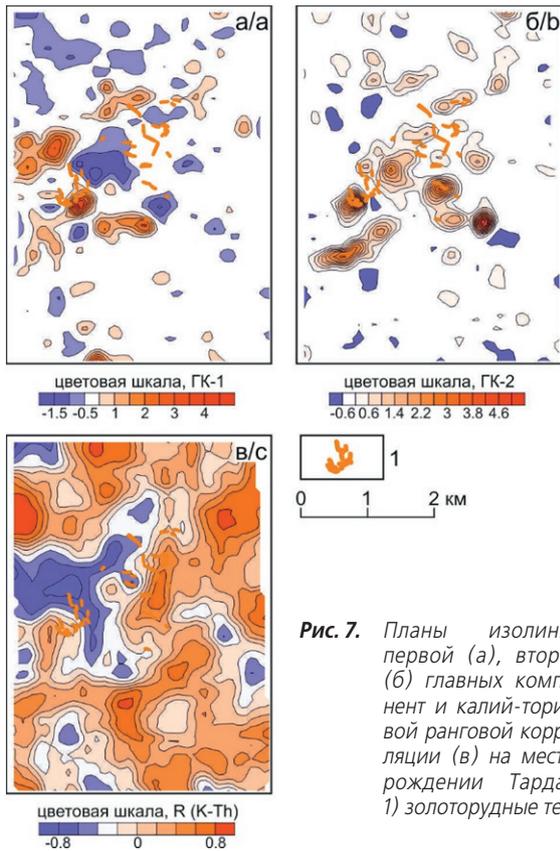
Примечание/Note: ГК – главная компонента/PC – principal component.

Многофакторный анализ методом главных компонент в своей основе несет информацию по статистическим характеристикам дисперсии и корреляции. По мнению Ф.П. Кренделева и др., дисперсию радиоактивных и других химических элементов можно рассматривать как реальную меру вероятности появления рудных концентраций в полях метаморфических преобразований пород. При этом «метаморфизм» понимается в широком смысле слова, охватывая региональный и контактовый, а также гидротермальные изменения в окорудном пространстве.

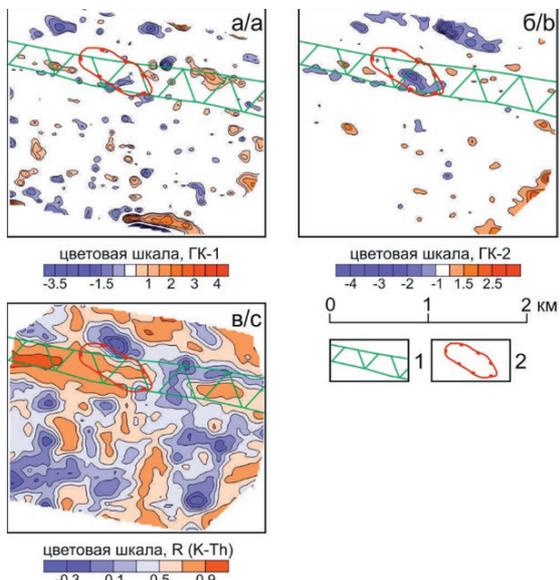
На Тарданском месторождении первая главная компонента имеет ярко выраженный тренд концентрирования калия, сопровождающийся существенным снижением содержания тория (табл. 2). Разнонаправленное поведение этих радионуклидов определило высокий факторный вес и его одинаковый с калием знак калий-ториевого отношения. Уран в данном случае в большей степени выступает как нейтральный элемент, что подчеркивается противоположными знаками факторных нагрузок для уран-ториевого и уран-калиевого отношений. Во второй главной компоненте из трех ЕРЭ своими особенностями распределения контрастирует уран. Однако высокие значения уран-ториевого и уран-калиевого отношений, если не в основном, то во многом, определяются синхронным

снижением калия и тория при практически постоянном калий-ториевом отношении. В пространственном распределении факторной нагрузки первой главной компоненты картируются сублинейные зоны высоких положительных значений (рис. 7, а). По своей радиогеохимической характеристике они больше похожи на продукты щелочного калиевого метасоматоза, чем на геологические тела гранитоидов или пород схожего состава. Во втором случае наблюдался бы синхронный рост содержания калия и тория, а не разные знаки их факторных весов. Положительные ореолы второй главной компоненты сосредоточены в пределах рудного поля и проявляют геологические границы областей развития наиболее обедненных калием и торием пород (рис. 7, б). Таким радиогеохимическим параметрам на площади съемки хорошо подходят мраморизованные известняки, а также низкорadioактивные скарны [19]. Корреляционный анализ в скользящем статистическом окне не дублирует, а дополняет картину взаимосвязей ЕРЭ. Корреляционные ореолы отрицательных связей наиболее информативной пары (kkK-kkTh) подчеркивают влияние калий-специализированных сублинейных структур на формирование аномальных эффектов в радиогеохимическом поле (рис. 7, в). По всей видимости, в особенностях распределения ЕРЭ на Тарданском месторождении проявили себя два основных момента. Один из них связан с формированием скарнов в блоках карбонатных пород, другой обусловлен наложенными гидротермальными процессами щелочной калиевой направленности на послемагматическом этапе, либо автотасоматической калийшпатизацией краевых частей отдельных массивов таннуольского комплекса [12].

Первая главная компонента гамма-спектрометрического поля рудопроявления Обручева определяет характер сугубо калиевых аномалий без существенного влияния на значения индикаторных отношений содержаний урана и тория (табл. 2). Пространственное распределение факторной нагрузки сложное для геологической интерпретации (рис. 8, а). Относительно крупные ореолы положительных значений единичны, а аномалия на юге участка имеет техногенное происхождение. На карте распределения факторной нагрузки второй главной компоненты обособляются отрицательные ореолы, имеющие связь с гидротермальными процессами (рис. 8, б). Они характеризуются невысокими концентрациями калия и тория с опережающим снижением содержания последнего (табл. 2). Это позволяет идентифицировать данные радиогеохимические аномалии как области окварцевания и кварц-жилыные зоны. Одинаковое направление изменений концентраций калия и тория относительно фоновых флуктуаций подтверждается появлением в границах кварц-вмещающих структур контрастных субширотных ореолов высокой положительной калий-ториевой корреляции (рис. 8, в).



**Fig. 7.** Contour maps of first (a), second (b) principal components and potassium-thorium rank correlation (c) of the Tardan deposit: 1) gold ore bodies

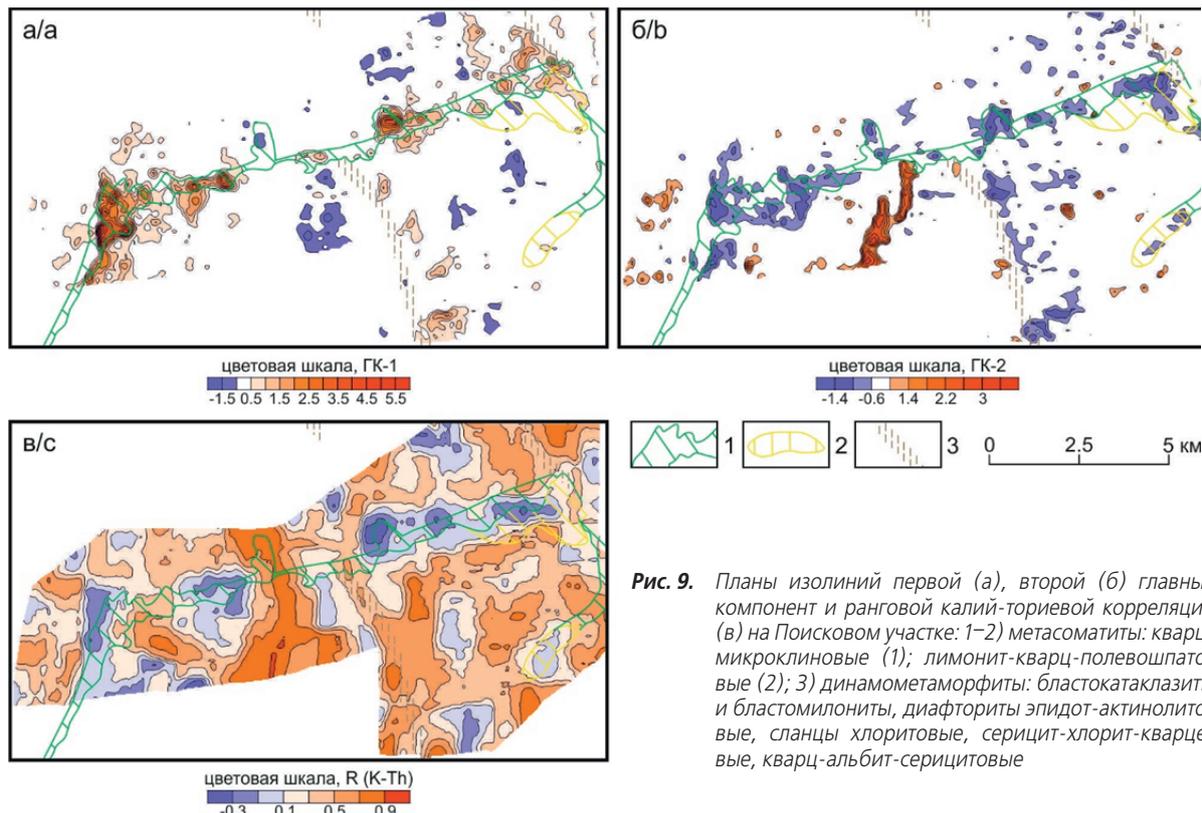


**Рис. 8.** Планы изолиний первой (а), второй (б) главных компонент и ранговой калий-ториевой корреляции (в) на рудопроявлении Обручева: 1) зоны прожилково-вкрапленной сульфидной и железисто-магнезиально карбонатной минерализации; 2) кварцево-жилвные зоны

**Fig. 8.** Contour maps of first (a), second (b) principal components and potassium-thorium rank correlation (c) of the Obruchev ore manifestation: 1) zones of streaky-impregnated sulfides and siderite-magnesium carbonate mineralization; 2) quartz-veinose zone

Изучение в Бодайбинском районе состава гидротермалитов гигантского по запасам золота месторождения Сухой Лог показало, что ранний (до-рудный) этап гидротермальной деятельности характеризуется натриевой специализацией. Березитоподобные продукты рудного этапа выделяют обратную тенденцию соотношения натриевых и калиевых слюд. При этом величина отношения содержания мусковит/парагонит находится в прямой зависимости от степени флюидопроницаемости пород и интенсивности потока рудообразующих растворов. Согласно результатам минералого-геохимических исследований, на расположенных близко и схожих геологических условиях небольшого золоторудного месторождения Кавказ и рудопроявления Успенское в распределении минеральных ассоциаций руд и рудовмещающих пород не выявлена гидротермально-метасоматическая зональность [20]. Это обстоятельство принимается как одно из основных доказательств отсутствия наложенных процессов метасоматоза, связанных с внешним источником вещества. Тем не менее, Е.Е. Паленова [20] отмечает, что золоторудные зоны контролируются ореолами повышенного содержания калия. Данный факт объясняется преимущественной локализацией жильных кварцевых и кварц-сульфидных зон в филлитовых толщах с относительно высоким содержанием слюд и преобладанием в их составе серицита над парагонитом. Росту содержания калия могла способствовать метаморфическая регенерация мусковита в зонах интенсивного синскладчатого расланцевания. В радиогеохимическом поле рудопроявления Обручева аномалии калиевой специализации местами трассируют периферийные части областей и зон окварцевания, но в целом они не получили значимого распространения. Данный факт наряду с отсутствием выраженных признаков антагонизма калия и тория, характерных для продуктов калиевого метасоматоза, указывает на невысокие промышленные перспективы рудопроявления.

Поисковый участок по гамма-спектрометрическим характеристикам наиболее полно соответствует радиогеохимической модели гидротермальных золоторудных объектов. В значениях обейх главных компонент выделяются ореолы развития адуляризованных зон (рис. 9, а, б). Различие двух компонент определяется поведением урана. Параметрами факторных весов первой главной компоненты подчеркивается, что золоторудный гидротермальный процесс сопровождался концентрированием калия и в меньшей степени урана при интенсивном выносе тория (табл. 2). Вторая главная компонента обособляет дисперсию радиогеохимического поля, характеризующегося геохимическим разъединением калия и урана при сравнительно слабой роли тория. Отрицательными значениями картируются зоны опережающего роста содержания калия относительно тория с невысокими уровнями накопления урана. Точки гамма-спектрометрических измерений



**Рис. 9.** Планы изолиний первой (а), второй (б) главных компонент и ранговой калий-ториевой корреляции (в) на Поисковом участке: 1–2) метасоматиты: кварц-микроклиновые (1); лимонит-кварц-полевошпатовые (2); 3) динамометаморфиты: бластокатаклазиты и бластомилониты, диафориты эпидот-актинолитовые, сланцы хлоритовые, серицит-хлорит-кварцевые, кварц-альбит-серицитовые

**Fig. 9.** Contour maps of first (a), second (b) principal components and potassium-thorium rank correlation (c) of the Poiskovy study area: 1–2) hydrothermal alterations: quartz-microcline (1), limonite-quartz-feldspathic (2); 3) dynamic metamorphism: blastocataclasite and blastomylonite, epidote-actinolite diaphorite, chlorite, sericite-chlorite-quartz and quartz-albite-sericite schist's

калий-урановой и калиевой специализации нередко в пространстве смешаны между собой. Поэтому в результате интерполяции данных конфигурация и положение «рудных» аномалий второй и первой главной компонент во многом совпадают. Возможно, разделение аномального радиогеохимического поля на две компоненты в какой-то мере обусловлено особенностями радиогеохимической зональности гидротермалитов. Однако мы имеем дело с характеристиками вторичных ореолов рассеяния химических элементов. Уран в зоне гипергенеза по сравнению с калием и торием является значительно более активным мигрантом. Отсюда велика вероятность существенного влияния на его распределение гипергенных процессов. Известно, что разделение зон концентраций калия и тория при гидротермально-метасоматических изменениях наиболее явно происходит в крупных трещинах. Поэтому наряду с интенсивностью аномалий главных компонент признаком высокой открытости проницаемых структур и значительных масштабов деятельности флюидогенных систем является появление крупных ореолов отрицательной калий-ториевой корреляции (рис. 9, в).

#### Заключение

1. Процедура оценки и учета значений фоновой флуктуации содержаний радиоактивных элементов положительно сказывается на дальнейшем выделении и анализе аномальной составляющей радиогеохимического поля.
2. Изучение особенностей распределения радиоактивных элементов и значений индикаторных отношений удобно проводить совместно с использованием многофакторного дисперсионного анализа методом главных компонент.
3. Главные компоненты гамма-спектрометрического поля позволяют проводить оценку радиогеохимической специализации аномалий, а также определять границы областей и зон с благоприятным для золоторудного процесса структурно-геологическим строением и признаками гидротермально-метасоматических процессов.
4. Применение гамма-спектрометрических поисков гидротермальных рудных месторождений целесообразно не только в аэроварианте при проведении мелко- и среднemasштабных работ, но и как наземный метод при крупномасштабных съемках в условиях литогенных стационарных ландшафтов открытых площадей.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рихванов Л.П. Радиогеохимическая типизация рудно-магматических образований (на примере Алтае-Саянской складчатой области). – Новосибирск: Изд-во СО РАН «Гео», 2002. – 536 с.
2. Володькова Т.В. Тренды отношений радиоактивных элементов и природа магматогенных месторождений Приамурья // Литосфера. – 2012. – № 2. – С. 67–89.
3. Dickson B.L., Scott K.M. Interpretation of aerial gamma-ray surveys – adding the geochemical factors // AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics. – 1997. – V. 17. – № 2. – P. 187–200.
4. Кренделев Ф.П., Миронов А.Г., Гофман А.М. Применение гамма-спектрометрических методов для оконтуривания рудных зон в Забайкалье // Геология и геофизика. – 1976. – № 8. – С. 67–75.
5. Shives R.B.K., Charbonneau B.W., Ford K.L. The detection of potassic alteration by gamma-ray spectrometry – recognition of alteration related to mineralization // Geophysics. – 2000. – V. 65. – № 6. – P. 2001–2011.
6. Ефимов А.В. Мультипликативный показатель для выделения эндогенных руд по азотагамма-спектрометрическим данным // Методы рудной геофизики. Гамма-спектрометрия при поисках рудных месторождений. – Л.: Геофизика, 1978. – С. 40–43.
7. Relation of thorium – normalized surface and aerial radiometric data to subsurface petroleum accumulations / D.F. Saunders, K.R. Burson, J.F. Branch, C.K. Thompson // Radiometric surveys in petroleum exploration: Association of Petroleum Geochemical Explorationists. Special Publication. – 1995. – № 3. – P. 96–110.
8. Maden N., Akaryali E. Gamma ray spectrometry for recognition of hydrothermal alteration zones related to a low sulfidation epithermal gold mineralization (eastern Pontides, NE Türkiye) // Journal of Applied Geophysics. – 2015. – № 122. – P. 74–85.
9. Irvine R.J., Robertson I. Interpretation of airborne geophysical data over Ok Tedi porphyry copper-gold ore body using image processing techniques // Ext. abstr. 5<sup>th</sup> ASEG Conference Exploration Geophysics. – Sidney, 1987. – V. 8. – P. 103–107.
10. Портнов А.М. О геохимической связи калия и тория в изверженных породах и околорудных метасоматитах // Доклады АН СССР. – 1978. – Т. 239. – № 6. – С. 1441–1444.
11. Dickson B.L., Fraser S.J., Kinsey-Henderson A. Interpretation aerial gamma-ray surveys utilising geomorphological and weathering models // Journal of Geochemical Exploration. – 1996. – № 57. – P. 75–88.
12. Коробейников А.Ф., Зотов И.А. Закономерности формирования месторождений золото-скарновой формации. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2006. – 235 с.
13. Петролого-геохимические черты околорудного метасоматизм в золоторудном месторождении Сухой Лог (Ленский район). Ч. 2. Петрология околорудного метасоматизма / И.В. Кучеренко, Р.Ю. Гаврилов, В.Г. Мартыненко, А.В. Верхолин // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 320. – № 1. – С. 28–37.
14. Золоторудные районы и узлы Алдано-Становой металлогенической провинции / А.В. Молчанов, А.В. Терехов, В.В. Шатов, О.В. Петров, К.А. Кукушкин, Д.С. Козлов, Н.В. Шатов // Региональная геология и металлогения. – 2017. – № 71. – С. 93–111.
15. Altdorff D., Dietrich P. Combination of electromagnetic induction and gamma spectrometry using K-means clustering: a study for evaluation of site partitioning // Journal of Plant Nutrition and Soil Science. – 2012. – № 175. – P. 345–354.
16. Соболев И.С., Чернев Е.М. Отражение глубинного строения юго-восточной части Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции в элементном составе осадочных пород дневной поверхности // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2010. – № 3. – С. 21–29.
17. Chemical diagenesis in near-surface zone above oil fields in geochemical exploration // I.S. Sobolev, N.P. Bredikhin, T. Bratec, A.Yu. Falk, O.S. Tolkachev, L.P. Rikhvanov, P.A. Tishin // Applied Geochemistry. – 2018. – № 95. – P. 33–44.
18. Ranjbar H., Masoumi F., Carranza E.J.M. Evaluation of geophysics and spaceborne multispectral data for alteration mapping in the Sar Cheshmeh mining area, Iran // International Journal of Remote Sensing. – 2011. – V. 32. – № 12. – P. 3309–3327.
19. Рихванов Л.П., Сарнаев С.И., Безходарнова Т.А. Радиогеохимические особенности скарнов // Геохимия. – 1985. – № 3. – С. 300–313.
20. Паленова Е.Е. Минералогия месторождений золота Копыловское, Кавказ, Красное (Артемовский рудный узел, Бодайбинский район): дис... канд. геол.-минерал. наук. – Миасс, 2015. – 202 с.

Поступила 21.05.2018 г.

## Информация об авторах

**Соболев И.С.**, кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Орехов А.Н.**, кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Соболева Н.П.**, кандидат географических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 550.835.232, 550.84.094.2, 550.8.053

## USE OF MULTIVARIATE STATISTICS ELEMENTS FOR GROUND GAMMA-RAY SPECTROMETRY DATA PROCESSING IN EXPLORATION OF HYDROTHERMAL GOLD DEPOSITS

Igor S. Sobolev<sup>1</sup>,  
geolsob@yandex.ru

Aleksander N. Orekhov<sup>1</sup>,  
orekhovan@mail.tomsknet.ru

Nadezhda P. Soboleva<sup>1</sup>,  
sobnadi@yandex.ru

<sup>1</sup> National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

**The relevance** of the research is determined by the requirements of improving the informative value of gamma-spectrometric exploration under the low contrast of radiometric anomalies. Large- and medium-size hydrothermal gold deposits in the developed areas have already been discovered. The prospecting of small gold objects, which poorly manifested in geochemical patterns, requires the use of additional steps for processing gamma-spectrometry data in order to extract «useful» signs from hydrothermal altered rocks. Enhancement of contrast in gamma-spectrometric effects from products of fluid-generating systems is possible due to the analysis of local variability in background content of radionuclides. The complexity of finding the solution for this problem is fed by the simultaneous influence of several strong natural factors on the features of the radiogeochemical field background fluctuation. The main factors are the mineral composition of rocks and landscape-morphological structure of the territories. In order to determine the peculiarities of radioactive anomalies, in addition to the natural radioactive elements content, the K/Th, U/Th and U/K ratios are often attracted. There is a need for their joint analysis, which can be simplified using statistical methods to identify the most informative features and reduce their number.

**The main aim** is: testing the algorithm of large-scale ground gamma-ray spectrometric surveys data processing with the use of statistics at three hydrothermal gold objects

**Methods:** surface gamma-spectrometric measurements of <sup>40</sup>K, <sup>238</sup>U (<sup>226</sup>Ra), <sup>232</sup>Th concentrations; statistical data processing using cluster and multi-factor variance analysis by principal component method

**Results.** We estimated the features of background fluctuations of natural radioactive elements content. The radiogeochemical peculiarities of gamma-spectrometric anomalies are defined based on multidimensional statistical analysis of concentration coefficients and indicative ratios. The correlation of the radioactive anomalies with wallrock alterations is estimated.

### Key words:

Gamma-spectrometry, multivariate statistics, hydrothermal wallrocks, radiogeochemical peculiarities, hydrothermal gold deposits.

### REFERENCE

- Rikhvanov L.P. *Radiogeokhimicheskaya tipizatsiya rudno-magmatischenkikh obrazovaniy (na primere Altae-Sayanskoy skladchatoy oblasti)* [Radiogeochemical typification of ore-magmatic formations (by the example of the Altai-Sayan folded area)]. Novosibirsk, SB RAS, GEO Publ., 2002. 536 p.
- Volodkova T.V. Trends of radioactive element ratios and the nature of the magmatogenic deposits of Priamurye. *Lithosphere*, 2012, vol. 2, no. 53, pp. 67–89. In Rus.
- Dickson B.L., Scott K.M. Interpretation of aerial gamma-ray surveys – adding the geochemical factors. *AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics*, 1997, vol. 17, no. 2, pp. 187–200.
- Krendeleev F.P., Mironov A.G., Gofman A.M. *Primenenie gamma-spektrometricheskikh metodov dlya okonturivaniya rudnykh zon v Zabaykalye* [Gamma-ray spectrometry applied to contouring of ore zones in Transbaikalia]. *Russian Geology and Geophysics*, 1976, no. 8, pp. 67–75.
- Shives R.B.K., Charbonneau B.W., Ford K.L. The detection of potassic alteration by gamma-ray spectrometry – recognition of alteration related to mineralization. *Geophysics*, 2000, vol. 65, no. 6, pp. 2001–2011.
- Efimov A.V. *Multiplikativnyy pokazatel dlya vydeleniya endogennykh rud po aerogamma-spektrometricheskim dannym* [Multiplicative index for exploration of endogenous ores using aerogamma-spectrometric data]. *Metody rudnoy geofiziki. Gamma-spektrometriya pri poiskakh rudnykh mestorozhdeniy* [Ore geophysics methods. Gamma-ray spectrometry explorations of ore deposits]. Leningrad, Geofizika Publ., 1978. pp. 40–43.
- Saunders D.F., Burson K.R., Branch J.F., Thompson C.K. Relation of thorium – normalized surface and aerial radiometric data to subsurface petroleum accumulations. Radiometric surveys in petroleum exploration. *Association of Petroleum Geochemical Explorationists*, Special Publication, 1995, no. 3, pp. 96–110.
- Maden N., Akaryali E. Gamma ray spectrometry for recognition of hydrothermal alteration zones related to a low sulfidation epithermal gold mineralization (eastern Pontides, NE Türkiye). *Journal of Applied Geophysics*, 2015, no. 122, pp. 74–85.
- Irvine R.J., Robertson I. Interpretation of airborne geophysical data over Ok Tedi porphyry copper-gold ore body using image processing techniques. *Ext. abstr. 5<sup>th</sup> ASEG Conference Exploration Geophysics*. Sidney, 1987. Vol. 8, pp. 103–107.
- Portnov A.M. *O geokhimicheskoy svyazi kaliya i toriya v izverzhennykh porodakh i okolorudnykh metasomatitakh* [About geochemical bond of potassium and thorium in igneous rocks and wallrock alterations]. *Reports of USSR Academy of Sciences*, 1978, vol. 239, no. 6, pp. 1441–1444.
- Dickson B.L., Fraser S.J., Kinsey-Henderson A. Interpretation aerial gamma-ray surveys utilising geomorphological and weathering models. *Journal of Geochemical Exploration*, 1996, no. 57, pp. 75–88.
- Korobeynikov A.F., Zotov I.A. *Zakonomernosti formirovaniya mestorozhdeniy zoloto-skarnovoy formatsii* [Formation patterns

- of skarn gold deposits]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. house, 2006. 235 p.
13. Kucherenko I.V., Gavrilov R.Yu., Martynenko V.G., Verkhozin A.V. Petrologic-geochemical features of peri-ore metasomatism in Sukhoi Log gold-ore deposit (Lena region). Part 2. Petrology of wallrock metasomatism. *Bulletin of Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 320, no. 1, pp. 28–37. In Rus.
  14. Molchanov A.V., Terekhov A.V., Shatov V.V., Petrov O.V., Kuskushkin K.A., Kozlov D.S., Shatova N.V. Gold ore districts and ore clusters of the Aldanian metallogenic province. *Regional Geology and Metallogeny*, 2017, no. 71, pp. 93–111. In Rus.
  15. Altdorff D., Dietrich P. Combination of electromagnetic induction and gamma spectrometry using K-means clustering: a study for evaluation of site partitioning. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2012, no. 175, pp. 345–354.
  16. Sobolev I.S., Chernev E.M. Reflection of deep structure in south-eastern part of the Western Siberian oil-and-gas bearing province in elemental composition of sedimentary surface rocks. *Geology, geophysics and development of oil and gas fields*, 2010, no. 3, pp. 21–29. In Rus.
  17. Sobolev I.S., Bredikhin N.P., Bratec T., Falk A.Yu., Tol-kachev O.S., Rikhvanov L.P., Tishin P.A. Chemical diagenesis in near-surface zone above oil fields in geochemical exploration. *Applied Geochemistry*, 2018, no. 95, pp. 33–44.
  18. Ranjbar H., Masoumi F., Carranza E.J.M. Evaluation of geophysics and spaceborne multispectral data for alteration mapping in the Sar Cheshmeh mining area, Iran. *International Journal of Remote Sensing*, 2011, vol. 32, no. 12, pp. 3309–3327.
  19. Rikhvanov L.P., Sarnaev S.I., Bezhodarnova T.A. Radiogeokhimicheskie osobennosti skarnov [Radiogeochemical features of skarns]. *Russian Geochemistry*, 1985, no. 3, pp. 300–313.
  20. Palenova E.E. *Mineralogiya mestorozhdeniy zolota Kopylovskoe, Kavkaz, Krasnoe (Artemovskiy rudnyy uzel, Bodaybinskiy rayon)*. Diss. Kand. nauk [Mineralogy of Kopylovskoe, Kavkaz and Krasnoe gold deposits (Artemovskiy ore node, Bodaybo region). Cand. Diss.]. Mias, 2015. 202 p.

Received: 21 May 2018.

#### Information about the authors

**Igor S. Sobolev**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Aleksandr N. Orekhov**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Nadezhda P. Soboleva**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.