

УДК 504.064.2:543.53

## Отвалы горных выработок Эльконского горста как источники естественных радионуклидов и токсичных элементов

С. Ю. АРТАМОНОВА, М. С. МЕЛЬГУНОВ, В. Н. ДЕМЕНТЬЕВ, Л. В. МИРОШНИЧЕНКО

*Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева Сибирского отделения РАН, проспект Академика Коптюга, 3, Новосибирск 630090 (Россия)**E-mail: artam@igm.nsc.ru*

(Поступила 30.05.11; после доработки 22.12.11)

### Аннотация

Приведены экспериментальные данные по водной миграции урана и микроэлементов-спутников золота из отвалов, сформированных при проведении геологоразведочных работ в 1960–1970 гг. на территории золотоурановых месторождений Эльконского горста (Якутия). Исследования проведены с использованием комплекса методов: рентгенофлуоресцентного анализа на синхротронном излучении, полупроводниковой высокоточной гамма-спектрометрии, сцинтилляционной гамма-спектрометрии, метода инструментального нейтронно-активационного анализа и др. Установлено, что отвалы горных выработок представляют собой объекты повышенного экологического риска.

**Ключевые слова:** рудные месторождения, отвалы, гипергенез, вторичные ореолы рассеяния, водный массоперенос, миграция радионуклидов, естественные радионуклиды, изотопы, токсичные элементы, экологический риск

### ВВЕДЕНИЕ

Горнодобывающая промышленность оказывает значительное влияние на окружающую среду: еще на стадии геологоразведочных работ извлекаются большие объемы пород с высокими концентрациями разных элементов в формах, неравновесных в поверхностных условиях. При выветривании эндогенных минералов отдельные элементы переходят в подвижные формы и активно мигрируют в окружающую среду. Установление закономерностей поведения токсичных и радиоактивных элементов в поверхностных условиях в зависимости от конкретных исходных параметров пород и ландшафтно-климатических условий – одна из актуальных проблем геохимии техногенеза.

Цель данной работы – изучение поведения естественных радиоактивных и токсичных элементов в гипергенных условиях на примере отвалов горных выработок на золо-

тоурановом месторождении Эльконского горста Якутии (рис. 1, а, б). Это месторождение было открыто в конце 1950-х годов. В 1960–1970-х гг. здесь велись интенсивные геологоразведочные работы: пройдено не менее 18 штолен, подготовлено четыре шахты. По нашим оценкам, объемы отвалов пород с повышенной радиацией, складированных у горных выработок, достигают 1 млн м<sup>3</sup>. После формирования отвалы не подвергались антропогенным преобразованиям, содержащиеся в них естественные радиоактивные элементы (ЕРЭ) перераспределились в границах отвала и мигрировали за его пределы под влиянием природных факторов.

### КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЛАНДШАФТНО-КЛИМАТИЧЕСКИХ И ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ

Эльконский горст относится к Алданскому нагорью и представляет собой приподнятое плоскогорье с абсолютными отметками от 800

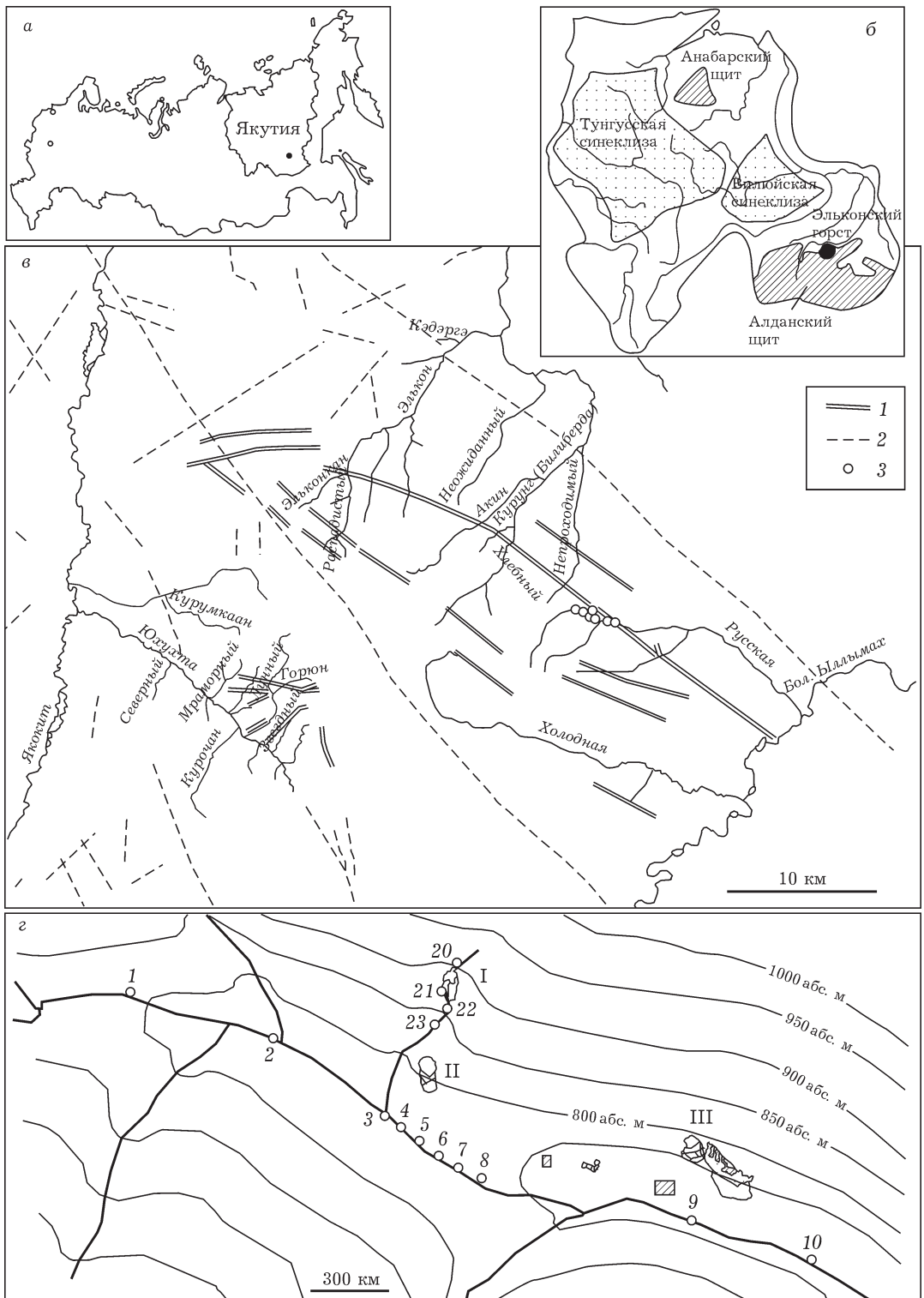


Рис.1. Расположение района исследований на территории Республики Саха (Якутия) (а), на схеме Сибирской платформы (б), в бассейне р. Русской (в, г): 1 – основные рудные зоны Эльконского золотоуранового месторождения, 2 – основные тектонические разломы (в, г), 3 – точки отбора проб (в, г); г – I – отвал штолен № 1/1 и 1/2, II – отвал штольни № 2 на нижнем склоне долины р. Русской, III – отвал штольни № 3 бис; 1–23 – номера точек отбора проб.

до 1300 м с крутыми склонами. Врез малых рек составляет около 300–400 м, крупных рек – около 500 м и более. Климат района резко-континентальный, с продолжительной морозной зимой и умеренно теплым дождливым летом. По данным метеонаблюдений, средняя температура января составляет  $-27.5^{\circ}\text{C}$ , средняя температура июля равна  $16.7^{\circ}\text{C}$ ; годовое количество осадков составляет 644 мм [1]. Суровый климат и высокие абсолютные отметки рельефа обусловили сохранение прерывистой многолетней мерзлоты [2]. На приводораздельных поверхностях развиты ландшафты горной тайги: лиственничные редколесья (*Larix cajanderi* Mayr.), заросли кедрового стланика (*Pinus pumila*), кустарники (*Arctous alpina*, *Empetrum nigrum*, *Cassiope ericoides*), лишайниковые (*Cladina stellaris*, *Cetraria cucullata*); почвы – подбуры таежные типичные и оподзоленные, маломощные и грубые по составу. На склонах дополнительно появляется береза карликовая (*Betula divaricata* Ledeb.), а в долинах – ива корзиночная (*Salix viminalis* L.), ольха кустарничковая (*Duschekia fruticosa*) на подбурях таежных, сильноощебнистых [2].

Эльконский горст – это поднятый в мезозое (в юре) блок архейского кристаллического фундамента на севере Алданского щита (см. рис. 1, б, в), прорванный серией щелочных субвулканических интрузий и разбитый системой разломов [3–5]. Тектонические разрывные нарушения развиты по трем главным направлениям (см. рис. 1, в) [6] – северо-восточному, субмеридианальному и северо-западному. Золотоурановые месторождения имеют эпitherмальное метасоматическое происхождение, контролируются молодыми и омоложенными древними (архейского заложения) разломами северо-западного направления.

Рудные тела представляют собой линейные штокверки мощностью от 0.5 до 10 м и более, протяженностью не менее 500–700 м, с крутым юго-западным падением. Верхняя граница рудных тел расположена на глубинах 200–500 м, кондиции до 2 км глубины не изменяются, нижняя граница рудных тел не определена. Выявлено более 500 кулисообразных и субпараллельных рудных залежей, формирующих единую рудную зону, которая простирается в северо-западном направлении на 30 км. Вмещающие породы: гранитогней-

сы, кристаллические сланцы, метадiorиты и др., – вдоль разломной зоны сначала замещались золотоносным пиритом-анкеритом-адуляром с последующим их катаклазом и дроблением, где брекчиевидные швы в дальнейшем были сцементированы урановой минерализацией, состоящей из пирита, карбоната и браннерита. В целом рудоносные метасоматиты состоят из бурого пелитизированного калишпата и прозрачного адуляра (40–60 %), карбонатов (35–45 %) и пиритов (5–15 %), браннерита (до 0.15 %) [6, 7]. Основной урановый минерал браннерит (титанат урана) приблизительного состава  $\text{UTi}_2\text{O}_6$  распределен в руде неравномерно, в виде прожилков микробрекчиевой и колломорфной текстуры, вкрапленностей и в виде тонких сростаний с пиритом и марказитом. Золотоносность эльконских калиевых метасоматитов в основном определяет тонкозернистый пирит (мельниковит), содержащий в среднем 80 г/т золота [7].

В рудной зоне Эльконского горста выделяют следующие металлогенические типы:

1. Золотобраннеритовый – преобладающий тип по всей протяженности рудной зоны Эльконского горста, структурно приуроченный к тектоническим разломам, с двумя последовательными этапами минерализации – пиритовым и браннеритовым.

2. Уран-серебро-золоторудный тип, названный Федоровским, выявлен в юго-западной части Эльконского горста. Отличается от первого типа наличием третьего этапа жильной сереброзолотой минерализации, содержащей более крупные выделения золота и серебра; структурно приурочен к площади развития мезозойских даек.

3. Золото-молибден-браннеритовый тип выявлен на юго-восточном фланге рудной зоны Эльконского горста. В отличие от первого типа характеризуется наличием третьего этапа жильной молибденовой минерализации (молибденит).

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Географические координаты определялись с помощью GPS-навигатора Etrex Garmin с абсолютной погрешностью не более 4–10 м. Радиометрическая съемка проведена сцинтилляционным радиометром СРП-68-01. Плот-

ность потока  $^{222}\text{Rn}$  ( $\text{мБк}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ ) и эквивалентная равновесная объемная активность (ЭРОА)  $^{222}\text{Rn}$  ( $\text{Бк}/\text{м}^3$ ) измерялись с помощью радонмера “Альфарад” РРА-01М-01; погрешность измерений составляла  $\pm 40\%$ .

Подвижность урана и элементов его распада оценена по степени нарушения их радиоактивного равновесия по соотношениям изотопов  $^{238}\text{U}/^{226}\text{Ra}$ ,  $^{210}\text{Pb}/^{226}\text{Ra}$ . Для характеристики пород использовано геохимическое отношение содержаний  $\text{Th}/\text{U}$ ,  $\text{Th}/\text{Ra}$ .

Пробоотбор материала отвалов, вмещающих коренных пород, поверхностных вод, прибрежного мелкозема аллювия, почв и мхов (род *Cladina*, род *Dicranum*, *Hylocomium*) проведен по стандартным методикам [8, 9]. В горных водотоках ввиду их высоких скоростей донные отложения не формируются, поэтому в точке отбора воды отбирались пробы прибрежных аллювиальных отложений (фракции  $< 3$  мм) и водных мхов, растущих на береговых валунах. Из водных мхов удаляли мелкозем и другие посторонние компоненты; мхи тщательно промывали в ручье и далее высушивали в тени в естественных условиях.

Пробоподготовка материала отвалов, аллювия и почв включала измельчение и просеивание через сито с размером ячейки 0.25 мм. Для разных анализов отбирались отдельные навески. Для рентгенофлуоресцентного анализа на синхротронном излучении (РФА-СИ) навеску измельчали до 200 меш., затем отбирали 30 мг вещества и спрессовывали в таблетку диаметром 6 мм. Пробы водных мхов концентрировались путем озоления.

Для определения содержаний ЕРЭ использовались следующие методы:

1. Сцинтилляционная  $\gamma$ -спектрометрия (СГС) проведена по интенсивности  $\gamma$ -излучения эквивалентного  $^{238}\text{U}$  (по  $^{226}\text{Ra}$ ),  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  с использованием колодезных низкофоновых сцинтилляционных детекторов с кристаллами  $\text{NaI}(\text{Tl})$ . При анализе допускается, что уран и радий в образцах находятся в состоянии радиоактивного равновесия. Навеска 200–300 г, предел обнаружения составляет 0.4 м. д., относительная погрешность не превышает 10% [10].

2. Прямая высокоразрешающая полупроводниковая  $\gamma$ -спектрометрия (ВПГС) с колодезным ППД. Для этого метода достаточно навески в 1–15 г; продолжительность изме-

рения в зависимости от активности определяемых изотопов варьировала от 1 до 24 ч. Пределы обнаружения составляли не менее 0.03 Бк, что соответствует содержаниям  $^{238}\text{U}$  0.25 м. д.,  $^{232}\text{Th}$  – 0.7–1.0 м. д. При концентрациях более 4 м. д. относительная погрешность не превышает 10% [11].

3. Инструментальный нейтронно-активационный анализ методом запаздывающих нейтронов (ИНАА) выполнен на исследовательском ядерном реакторе ИРТ-Т при НИИ ядерной физики при ТПУ (Томск). Навеска 5 г, относительная погрешность не превышает 5%, предел обнаружения  $5 \cdot 10^{-7}\%$ .

На станции элементного анализа ВЭПП-3 ИЯФ СО РАН методом РФА-СИ и регистрацией на  $\text{Si}(\text{Li})$ -детекторе определены концентрации в твердых пробах не только ЕРЭ, но и целого ряда других элементов, включая тяжелые металлы и мышьяк [12]. Нижние пределы обнаружения элементов составляют до 0.1 м. д. в зависимости от энергии возбуждения эмиссионных линий, относительная погрешность не более 10–15%.

Несмотря на различия в массах навесок (от 30 мг до 350 г), данные по содержанию  $\text{U}$  и  $\text{Th}$ , полученные разными методами, оказались сопоставимы. Так, коэффициент корреляции между значениями концентрации урана, полученными методами ВПГС, ИНАА и РФА-СИ, превышает 0.99, а в случае использования методов ВПГС и СГС – 0.98. При определении содержания тория коэффициент корреляции между ВПГС и РФА-СИ равен 0.92, а между ВПГС и СГС – 0.93. На рис. 2 показана сходимость определения содержаний  $\text{U}$  и  $\text{Th}$  различными методами.

Концентрации анионов в пробах воды определялись титрованием; точность определения  $\text{HCO}_3^-$  не превышала 12%,  $\text{SO}_4^{2-}$  – 23%,  $\text{Cl}^-$  – 16%. Концентрации основных катионов, ЕРЭ и других элементов в водных пробах измерялись с помощью методов ICP-MS и ICP-AES. Предел обнаружения урана и тория составил 0.01 мкг/л с относительной погрешностью 10%. Кроме того, содержание урана в водных пробах определяли с помощью лазернофлуоресцентного метода на приборе “Ангара” (АУФ/О/МІ). В качестве источника возбуждения флуоресценции применялся импульсный лазер ультрафиолетового излу-

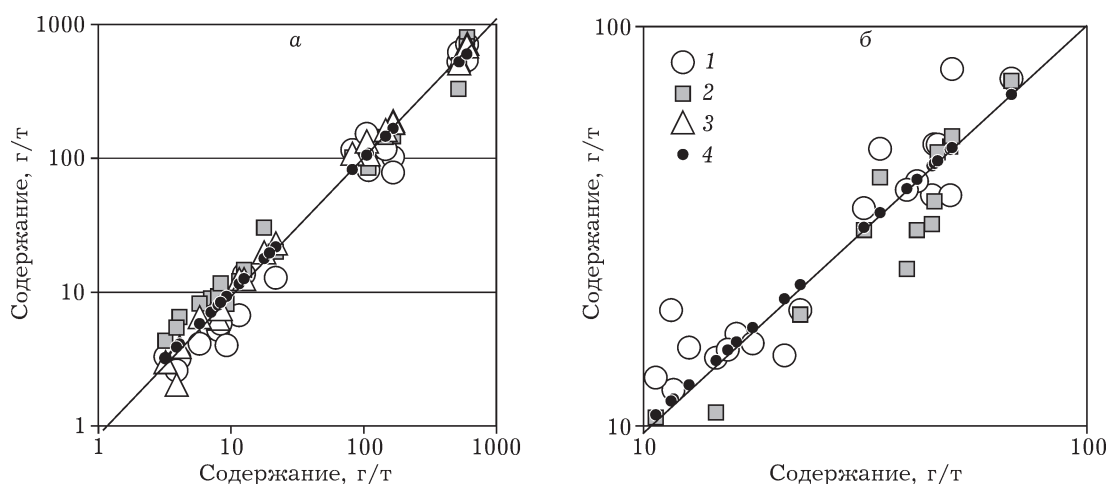


Рис. 2. Сходимость результатов определения содержания  $^{238}\text{U}$  (а) и  $^{232}\text{Th}$  (б) различными методами анализа: 1 – сцинтилляционная  $\gamma$ -спектрометрия (СГС), 2 – рентгенофлуоресцентный анализ на синхротронном излучении (РФА-СИ), 3 – инструментальный нейтронно-активационный метод (ИНАА), 4 – высокоточная полупроводниковая  $\gamma$ -спектрометрия (ВПГС).

чения. Диапазон измерения содержания урана в водном растворе составляет  $(2 \cdot 10^{-8}) - (1 \cdot 10^{-4})$  г/л. При измерениях концентраций урана от  $10^{-6}$  до  $10^{-4}$  г/л относительная погрешность измерений не превышает 10 %.

Подвижные формы элементов изучены методом ступенчатого выщелачивания [13]. Полный силикатный состав проб отвалов определен с помощью рентгенофлуоресцентного анализа на многоканальном рентгеновском спектрометре СРМ-25.

Минеральный состав проб изучен с применением фазового рентгеноструктурного метода с использованием порошкового дифрактометра ДРОН-3М ( $\text{CuK}\alpha$ -излучение, подаваемое на трубку напряжение  $U = 40$  кВ, сила тока  $I = 24$  мА). Проведено изучение петрографических шлифов гранодиоритов (вмещающих пород) и околорудных метасоматитов. Камеральная обработка данных и построение ГИС проекта района исследования выполнены с помощью программного пакета ArcView 3.3 с модулями Spatial и 3D Analyst.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В качестве объекта детального исследования выбран отвал горной выработки по левому борту верховья р. Русской (см. рис. 1, в, г)

на участке юго-восточного фланга рудной зоны Эльконского горста с переходным типом оруденения (от золото-браннеритового к золото-молибден-браннеритовому).

Верхняя часть отвала образует субгоризонтальную площадку в средней части склона горы на высоте около 890 абс. м между устьями двух штолен – № 1/1, 1/2, расположенными на расстоянии 32 м друг от друга. От центральной площадки отвала отходят три языка. Отвал сложен радиоактивным песчано-щебнистым материалом (рис. 3). С южной стороны к отвалу примыкает расположенный ниже крупнообломочный щебнисто-глыбовый навал вмещающих пород. По нашим оценкам, общий объем отвала составляет не менее 64 тыс. м<sup>3</sup>. На склонах незаросшего отвала имеется живая осыпь, у основания и по границам отвала произрастают единичные деревья лиственницы, березы и других пород. Отвал дренируется ручьем.

Исследования показали, что отвал преимущественно сложен обломками рудных и околорудных калийных метасоматитов, состоящих из калиевого полевого шпата (адуляра), кварца, плагиоклазов, в малых количествах присутствует пренит, пирит, серицит, гипергенный ярозит и другие окисленные рудные фазы. Породы относятся к кислым щелочным, содержание  $\text{SiO}_2$  составляет не менее 66 %, а содержание  $\text{K}_2\text{O}$  – до 7.5–9.0 %.

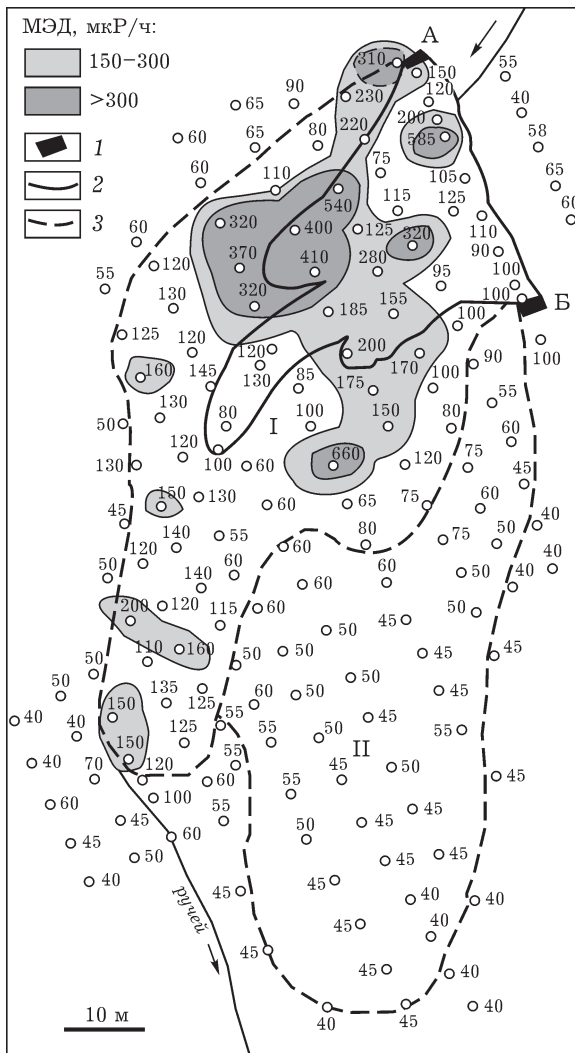


Рис. 3. Поле мощности экспозиционной дозы  $\gamma$ -излучения (МЭД) у поверхности отвала рудных и околорудных метасоматитов (I) и глыбовых вмещающих пород гранито-диоритов (II): 1 – устье штолен № 1/1 (А) и 1/2 (Б), 2 – границы верхней площадки отвала, 3 – границы отвала.

Западный язык отвала наиболее радиоактивен: средняя мощность экспозиционной дозы  $\gamma$ -излучения (МЭД) составляет  $\sim 200$  мкР/ч, максимальное значение – приблизительно 800 мкР/ч (см. рис. 3). В этой части отвал состоит преимущественно из обломков окисленных рудных метасоматитов охристо-бурого цвета с содержанием урана 500–600 г/т (табл. 1). В единичных образцах содержание U достигает 1.2 %, что почти в 4400 раз превышает кларковое содержание U в земной коре (2.7 г/т) [14]. При этом содержание  $TiO_2$  возрастает пропорционально от 0.7 до  $\sim 1.9$  %. С увеличением содержания в образце урана растет содержание

и  $TiO_2$  (максимально до трех кларков земной коры). Очевидно, это связано с браннеритовой минерализацией урана [14].

На центральном и южном языках отвала со средним значением МЭД  $\sim 120$  мкР/ч преобладают обломки околорудных метасоматитов палевого цвета со средним содержанием U, примерно равным 100–150 г/т. Поле высоких значений МЭД не выходит за границы отвала метасоматитов.

На прилегающем щебнисто-глыбовом навалу вмещающих серых гранодиоритов МЭД составляет всего 45–55 мкР/ч, что соответствует естественному радиационному фону горных склонов (35–40 мкР/ч). Содержание урана в гранодиоритах составляет  $\sim 4$  г/т, тория – приблизительно 9 г/т,  $K_2O$  – 5.38 % при кларках земной коры 2.7, 10.5 г/т и 2.8 % соответственно [14]. Соотношение Th/U находится в диапазоне значений 2.4–4.4, что чуть меньше кларковых соотношений этих естественных радионуклидов. Соотношение активностей изотопов урана и элементов его распада во вмещающих породах близко к 1, следовательно, в них сохраняется радиоактивное равновесие, отсутствует значимый вынос урана и эманация радона (см. табл. 1).

Несмотря на высокое содержание тория (30–200 г/т), в материале отвалов соотношение Th/U гораздо ниже и составляет около 0.3 для околорудных метасоматитов и 0.1–0.01 – для рудных, что связано с их значительным обогащением ураном. Согласно расчетам, запасы урана в отвале оцениваются в 15–70 т, а запасы тория не превышают 5–8 т при плотности породы  $2.6$  г/см<sup>3</sup> и пористости рыхлого материала отвалов, примерно равной 30 %.

Выявлена тенденция роста содержания U и Th с уменьшением размеров обломков в мелкоземле отвалов. Во фракциях  $<1$  мм среднее содержание U и Th значительно выше, нежели в более крупных фракциях (см. табл. 1). Повидимому, в мелких фракциях доля урановорудных минералов выше ввиду того, что их размеры меньше по сравнению с размерами породообразующих минералов (калиевых полевых шпатов и кварца) (см. табл. 1). В свою очередь, содержание  $K_2O$  в мелких фракциях (размером менее 1 мм) снижено. Максимальное содержание  $K_2O$  наблюдается во фракции

ТАБЛИЦА 1

Содержание U, Th и K<sub>2</sub>O в материале отвала

| Номер пробы | МЭД,* мкР/ч | Уран    |         | Элементы распада U, Бк/кг |         |         |         | Торий, м. д. |        |     | K <sub>2</sub> O, мас. % |      | Соотношение активностей** |                                     | <sup>232</sup> Th/ <sup>238</sup> U |                                      |
|-------------|-------------|---------|---------|---------------------------|---------|---------|---------|--------------|--------|-----|--------------------------|------|---------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|
|             |             | ИНАА    |         | ВПГС                      | СГС     | 222Rn   | 210Pb   | 226Ra        | РФА-СИ |     | ВПГС                     | РФА  | ВПГС                      | <sup>238</sup> U/ <sup>226</sup> Ra |                                     | <sup>210</sup> Pb/ <sup>226</sup> Ra |
|             |             | U       | U       |                           |         |         |         |              | Th     | Th  |                          |      |                           |                                     |                                     |                                      |
| 1           | ~55         | 5.43    | 2.04    | 3.8                       | 48      | 48      | 57      | 32           | 9.3    | 9.0 | 8.6                      | -    | 5.38                      | 0.97                                | 1.18                                | 2.4-4.4                              |
|             |             | 67.5    | 25.4    | 47                        |         |         |         |              |        |     |                          |      |                           |                                     |                                     |                                      |
| 2а          | ~100        | 101     | 109     | 82.4                      | 1046    | 760     | 815     | 1432         | 31     | 31  | 35                       | 8.75 | 8.84                      | 0.98                                | 0.78                                | 0.34                                 |
|             |             | 1260    | 1350    | 1024                      |         |         |         |              |        |     |                          |      |                           |                                     |                                     |                                      |
| 2б          | ~400        | 103     | 134     | 106                       | 1503    | 1022    | 1117    | 1891         | 42     | 34  | 49                       | 9.03 | 8.66                      | 0.87                                | 0.74                                | 0.29                                 |
|             |             | 1280    | 1660    | 1310                      |         |         |         |              |        |     |                          |      |                           |                                     |                                     |                                      |
| 2в          | ~400        | 144     | 162     | 146                       | 2606    | 1642    | 1646    | 1453         | 50     | 49  | 38                       | 7.56 | 7.74                      | 0.70                                | 0.63                                | 0.32                                 |
|             |             | 1790    | 2020    | 1820                      |         |         |         |              |        |     |                          |      |                           |                                     |                                     |                                      |
| 3а          | ~400        | 329     | 538     | 520                       | 6858    | 5526    | 5306    | 6570         | 37     | 45  | 51                       | 8.60 | 8.29                      | 0.94                                | 0.77                                | 0.09                                 |
|             |             | 4090    | 6690    | 6470                      |         |         |         |              |        |     |                          |      |                           |                                     |                                     |                                      |
| 3б          | ~400        | 495     | 511     | 525                       | 6877    | 5333    | 5093    | 7678         | 48     | 46  | 51                       | 8.67 | 8.76                      | 0.95                                | 0.74                                | 0.09                                 |
|             |             | 6150    | 6360    | 6530                      |         |         |         |              |        |     |                          |      |                           |                                     |                                     |                                      |
| 3в          | ~400        | 801     | 718     | 603                       | 8017    | 6426    | 5831    | 8850         | 53     | 50  | 78                       | 7.52 | 7.96                      | 0.94                                | 0.73                                | 0.08                                 |
|             |             | 9960    | 8930    | 7500                      |         |         |         |              |        |     |                          |      |                           |                                     |                                     |                                      |
| 4           | ~450        | 686     | 687     | 601                       | 8437    | 6421    | 6584    | 6703         | 73     | 68  | 74                       | 9.54 | 8.55                      | 0.89                                | 0.78                                | 0.11                                 |
|             |             | 8530    | 8550    | 7470                      |         |         |         |              |        |     |                          |      |                           |                                     |                                     |                                      |
| 5           | ~600        | 11 407  | 9658    | 12 707                    | 278 759 | 234 928 | 188 917 | н.д.         | 193    | 118 | н.д.                     | 4.91 | 6.81                      | 0.57                                | 0.71                                | 0.01                                 |
|             |             | 141 800 | 120 060 | 157 970                   |         |         |         |              |        |     |                          |      |                           |                                     |                                     |                                      |

Примечания. 1. Номера проб: 1 – вмещающие гранодиориты; 2 – мелкозернистые кварц-адуляриновые метасоматиты (2а – фракция >2 мм, 2б – фракция 1–2 мм; 2в – фракция <1 мм); 3 – мелкозернистые кварц-адуляриновые метасоматиты (3а – фракция >2 мм, 3б – фракция 1–2 мм; 3в – фракция <1 мм); 4 – рудный метасоматит; 5 – то же, но с высокой МЭД. 2. Методы исследования: РФА-СИ – рентгенофлуоресцентный анализ на синхротронном излучении (навеска 30 мг); ИНАА – инструментальный нейтронно-активационный анализ (навеска 5 г); РФА – силикатный анализ, ВПГС – прямая высокоразрешающая полупроводниковая γ-спектрометрия (навески 10–15 г), СГС – сцинтилляционная гамма-спектрометрия (навески 300–350 г).

\*МЭД – мощность экспозиционной дозы γ-излучения.

\*\*Соотношение активностей изотопов проведено с использованием данных ВПГС и ИНАА.

1–2 мм, что обусловлено наличием кристаллов калиевых полевых шпатов и их обломков.

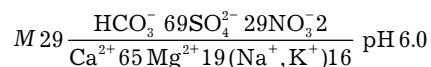
Для образцов отвалов соотношение активностей  $^{238}\text{U}/^{226}\text{Ra} \leq 1$ . Данный факт свидетельствует о том, что уран в отвале достоверно не накапливается: он сохраняется в отдельных обломках и (или) неравномерно выносится. Браннерит подвергся неравномерному окислению еще на стадии регрессивного метасоматоза, потому последующее его выветривание в отвале – переход урана (IV) из браннерита в подвижную форму U(VI) – носит неравномерный характер. Просматривается тенденция уменьшения соотношения  $^{238}\text{U}/^{226}\text{Ra}$  для более мелких фракций: например, если для более крупной фракции 2–3 мм пробы № 2  $^{238}\text{U}/^{226}\text{Ra} \sim 1$ , то для фракции <1 мм оно снижается до 0.7 (см. табл. 1). По-видимому, уменьшение соотношения  $^{238}\text{U}/^{226}\text{Ra}$  для мелких фракций связано с увеличением доли урансодержащих минералов (и, следовательно, с ростом валового содержания урана) и удельной поверхности этих зерен при уменьшении их размеров. В образце № 5, наиболее богатом ураном, установлено наибольшее смещение радиоактивного равновесия:  $^{238}\text{U}/^{226}\text{Ra} = 0.57$  (см. табл. 1).

Среднее соотношение активностей  $^{210}\text{Pb}/^{226}\text{Ra} \sim 0.74$ , что указывает на постоянную равномерную эманацию радона с материала отвала. В ходе прямых измерений получены следующие данные по плотности потока радона, мБк/(с · м<sup>2</sup>): с поверхности рудного языка –  $151 \pm 30$ , с поверхности центрального языка –  $94 \pm 19$ , около устьев штолен –  $45 \pm 14$ . У устьев штолен мощность насыпи минимальная, поэтому поток радона здесь слабее. Объемная активность радона внутри штольни № 1/1 (у входов) достигает  $(7275 \pm 1454)$  Бк/м<sup>3</sup>, внутри штольни № 1/2 –  $(1800 \pm 360)$  Бк/м<sup>3</sup>, т. е. в закрытых пространствах идет опасное накопление радона.

Экспериментально установлено, что около 0.02 мас. % урана, содержащегося в отвале, находится в подвижной водорастворимой форме. Доля потенциально подвижного в слабокислой среде урана находится на уровне 1.5 мас. %, что составляет примерно 14 кг водорастворимого или 1050 кг лабильного урана при его запасе в отвале в 70 т.

В ходе золотого этапа(ов) оруденения урановорудные метасоматиты в значительной степени обогащались халькофильными элементами – спутниками золотой минерализации. Нами установлено, что в материале отвала содержания Ag, As, Sb, Te, Tl и Hg в десятки и более раз превышают кларки земной коры [14], г/т (количество кларков): Ag 2–16 (38–300), Sb 16–130 (40–325), Te 0.9–6.6 (900–6600), As 180–330 (38–69), Tl 18–170 (20–189), Hg 2–3 (40–60). В отвале содержание Mo составляет 25.7–109 г/т (31–91 кларков), Cu – 160–360 г/т (6–13 кларков), Pb – 30–540 г/т (2–30 кларков). Таким образом, помимо урана и тория в отвале выявлен целый комплекс халькофильных элементов, включая токсичные Tl, As, Sb, Mo, Hg, Cd. Существенная доля ртути находится в подвижной форме: 5.7 мас. % – в водорастворимой форме, 10.7 мас. % – в подвижной форме в условиях слабокислой среды. Что касается мышьяка, то его содержание в водорастворимой форме составляет 0.02 мас. %, подвижной в слабокислой среде – 0.07 мас. %. Для остальных изученных элементов доля подвижной формы составляет десятые и сотые доли процента.

Воды ручья, дренирующего отвал, нейтральные ультрапресные сульфатно-гидрокарбонатные натриево-магниевые-кальциевые (см. рис. 1, з, т. 20):



Нейтральные воды ручья обеднены органическими веществами (перманганатная окисляемость всего около 1.5 мг O<sub>2</sub>/л, ионы аммония отсутствуют). По-видимому, это связано с тем, что в питании вод ручья доминируют холодные грунтовые воды горных склонов и источников подземных вод.

При прохождении через отвал стоки ручья обогащаются сульфатами (их содержание возрастает с 3 до 10 мг/л), ионами магния (с 1.6 до 3 мг/л), ЕРЭ и различными микроэлементами халькофильной группы. Привнос вещества из отвала настолько существенен, что в значительной мере повышается и минерализация ручья: с 29 мг/л выше отвала (т. 20) до 36 мг/л в подножье отвала (т. 21). При этом тип вод изменяется на гидрокарбонатно-сульфатный (см. рис. 1, з):



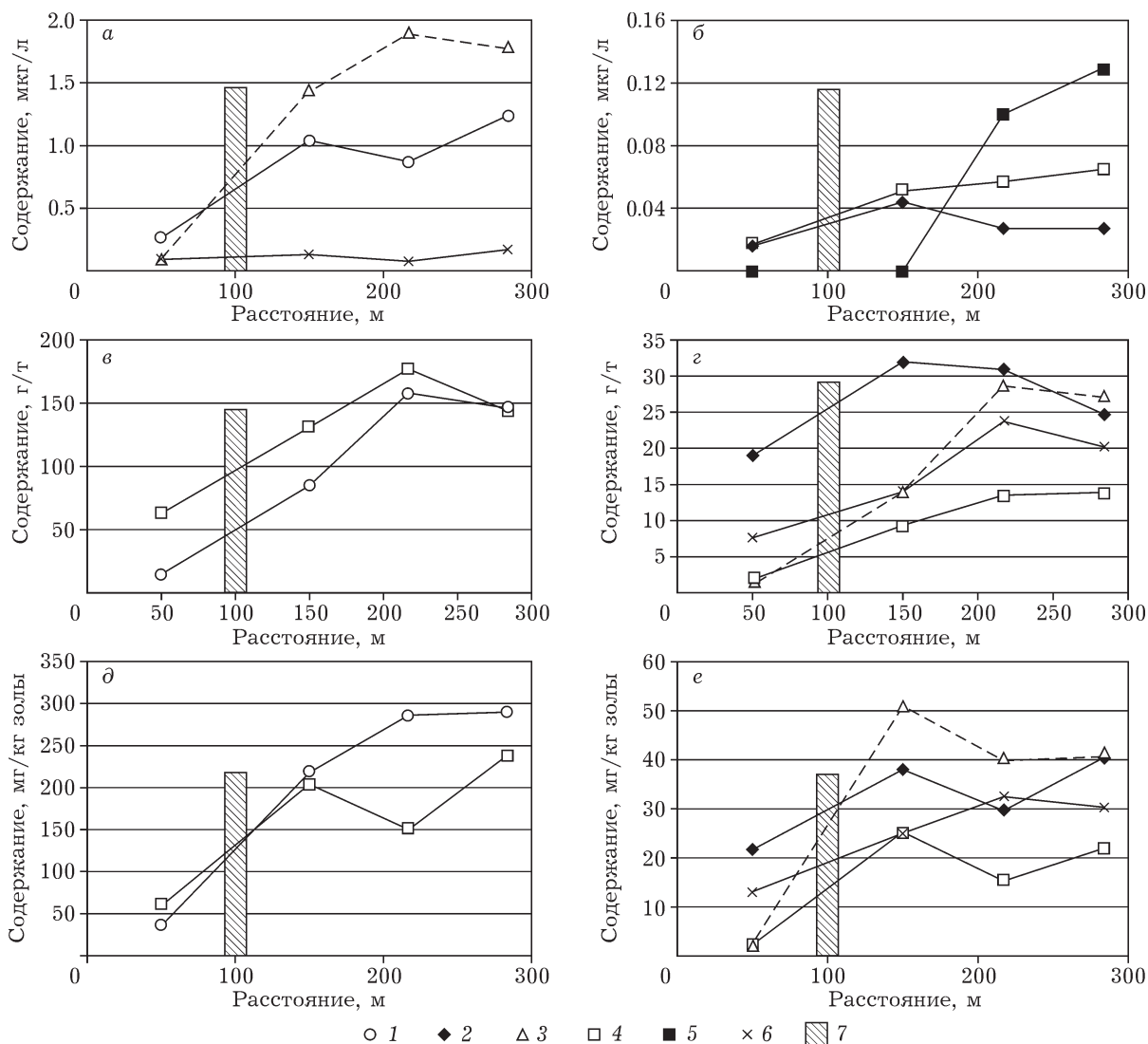


Рис. 4. Содержание естественных радионуклидов и микроэлементов в воде (а, б), в прибрежном мелкоземном аллювии (<3 мм) (в, г) и в водных мхах (д, е) ручья, дренирующего отвал горной выработки в верховье р. Русской: 1 – U, 2 – Th, 3 – Mo, 4 – Sb, 5 – As, 6 – Tl, 7 – отвал; на оси X указано расстояние от истока ручья вниз по течению.

$$M\ 36 \frac{SO_4^{2-} 51HCO_3^- 48NO_3^- 1}{Ca^{2+} 57Mg^{2+} 29(Na^+, K^+) 14} pH\ 6.0$$

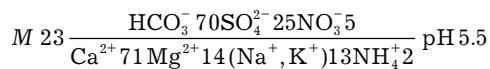
Ниже отвала в водах ручья резко возрастают концентрации ЕРЭ и ряда халькофильных элементов по сравнению с их содержанием в ручье выше отвала (рис. 4, а, б). Так, содержание U увеличивается почти в 5 раз (с 0.26 до 1.24 мкг/л), Mo – почти в 18 раз (с 0.077 до 1.44 мкг/л), Cd – в 27.5 раз (с 0.004 до 0.11 мкг/л), Sb – почти в 4 раза (с 0.017 до 0.065 мкг/л). Хотя для Th как элемента-гидролизата не характерна водная миграция, при дренировании отвала воды в значитель-

ной мере обогащаются этим элементом (с 0.016 до 0.044 мкг/л). Однако нужно отметить, что уже через несколько десятков метров ниже отвала концентрации тория в воде снижаются почти вдвое, в то время как концентрации более подвижных в воде элементов (U, Mo) остаются неизменными (см. рис. 4, а, б). В водах ручья содержание Tl достигает 0.17 мкг/л, Hg – 0.084 мкг/л. В ручье выше отвала As не обнаружен, а в нижнем течении его содержание достигало 0.13 мкг/л. Это свидетельствует о существенном водном массопереносе ЕРЭ и потенциально токсичных микроэлементов из отвалов горных выработок.

Высокие скорости течения в горном ручье обуславливают интенсивный механический снос материала отвала, особенно в весенние паводки, что приводит к резкому обогащению аллювия естественными радионуклидами и элементами-спутниками золота. От отвала ниже по течению в аллювиальном мелкоземe (<3 мм) нами установлен резкий скачок содержания изучаемых элементов: урана – почти в 15 раз (с 13 г/т выше отвала до 180 г/т ниже отвала), молибдена – в 11–23 раза (от 1.25 до 28.9 г/т), сурьмы – в 5–7.5 раза (с 1.83 до 13.9 г/т). Содержание следующих элементов увеличивается в 2–3 раза: тория – с 19.5 до 41.4 г/т, мышьяка – с 63 до 177 г/т, таллия – с 7.6 до 23.7 г/т (см. рис. 4, в, г). Из-за сноса калиевых полевых шпатов в пробах аллювиальных отложений почти вдвое возрастает содержание  $K_2O$  (с 2.7 до 6.2 мас. %).

Вместе с тем методом РФА-СИ установлено, что водные мхи, растущие на камнях по берегам ручья, интенсивно сорбируют ЕРЭ и халькофильные элементы. Ниже отвала в водных мхах содержание U возрастает в 6–8 раз (с 35.6 мг/кг золы выше отвала до 290 мг/кг золы ниже отвала), Mo – в 15–19 раз (с 2.7 до 40.8 мг/кг золы), Sb – в 7–11 раз (с 2.3 до 25.3 мг/кг золы). В меньшей степени растут содержания Th (в 1.8–2 раза – с 21.7 до 40.5 мг/кг золы), As (в 2.5–3.4 раза, с 59 до 239 мг/кг золы), Tl (в 2–2.5 раза, с 13.1 до 32.5 мг/кг золы) (см. рис. 4, д, е).

Через 580 м ручей впадает в р. Русскую с ультрапресными сульфатно-гидрокарбонатными натриево-магниевыми-кальциевыми водами:



В силу полноводности р. Русской ее воды менее минерализованы по сравнению с водами ручья. Водосбор на кристаллических архейских гранитоидах способствует формированию слабокислых поверхностных вод с рН 5.5. Для речной воды характерно развитие биоты, наличие в ее составе ионов аммония. Перманганатная окисляемость вод составляет около 5 мг  $O_2$ /л, что соответствует обычным проточным поверхностным водам.

В месте впадения вод исследованного ручья в р. Русскую (см. рис. 1, г, т. 3) наблюдается резкий всплеск концентраций ЕРЭ

и халькофильных элементов в пробах речной воды, аллювиальных отложений и водных мхов по сравнению с верхним течением реки (рис. 5). Возможно, гидрогеохимическая аномалия в месте впадения ручья становится столь яркой вследствие попадания в ручей дренажных стоков отвала штольни № 2, расположенного в нижнем течении ручья (см. рис. 1, г, II). Например, в источнике, вытекающем из штольни № 2, минерализация составляет около 110 мг/л и в нем установлены очень высокие содержания ЕРЭ и халькофильных элементов, мкг/л: U 32, Mo 27, As 0.73, Tl 0.41, Sb 0.23. Полученные данные в десятки раз превышают содержание этих элементов в дренажных стоках изученного отвала штолен № 1/1 и 1/2.

В речной воде в районе устья ручья резко возрастают содержания исследуемых элементов: U – в 7.6 раза (с 0.13 до 0.99 мкг/л), Mo – в 21 раз (с 0.044 до 0.94 мкг/л), Sb – в 3.4 раза (с 0.01 до 0.034 мкг/л), Tl – в 2.2 раза (с 0.037 до 0.082 мкг/л) (см. рис. 5, а, б). Концентрации тория в водах р. Русской практически не изменяются и остаются на уровне 0.15 мкг/л.

В мелкоземe аллювия р. Русской в месте впадения в нее ручья и чуть ниже по течению наблюдается скачок содержаний этих элементов: U – в 7 раз (с 3.2 до 21.7 г/т), Mo – в 3 раза (с 0.7 до 2.17 г/т), As – в 9 раз (с 8.1 до 72.4 г/т), Sb – в 14 раз (с 0.43 до 5.85 г/т), Tl – в 4.3 раза (с 0–1.26 до 5.4 г/т) (см. рис. 5, в, г). Содержание тория в аллювиальном мелкоземe не изменяется и составляет 14.6–17.6 г/т.

Установлено влияние вод ручья на состав водных мхов р. Русской. В районе его устья резко возрастает содержание ЕРЭ и халькофильных элементов: U – в 4.5 раза (с 12.7 до 57 мг/кг золы), Mo – в 5.8 раза (с 1.24 до 7.21 мг/кг золы), As – в 4 раза (с 10.3 до 43 мг/кг золы), Sb – в 4.2 раза (с 0.43 до 1.82 мг/кг золы), Tl – в 2.4 раза (с 3.1 до 7.5 мг/кг золы) (см. рис. 5, д, е). Содержание тория в пробах водных мхов, отобранных в р. Русской, также практически не изменяется и находится на уровне 7.7–9.3 мг/кг золы.

Из данных рис. 6, а видно, что соотношение Th/U в пробах компонентов ручья, отобранных ниже отвала после его дренирования, резко снижается. Так, в пробах воды ручья, отобранных ниже отвала, среднее

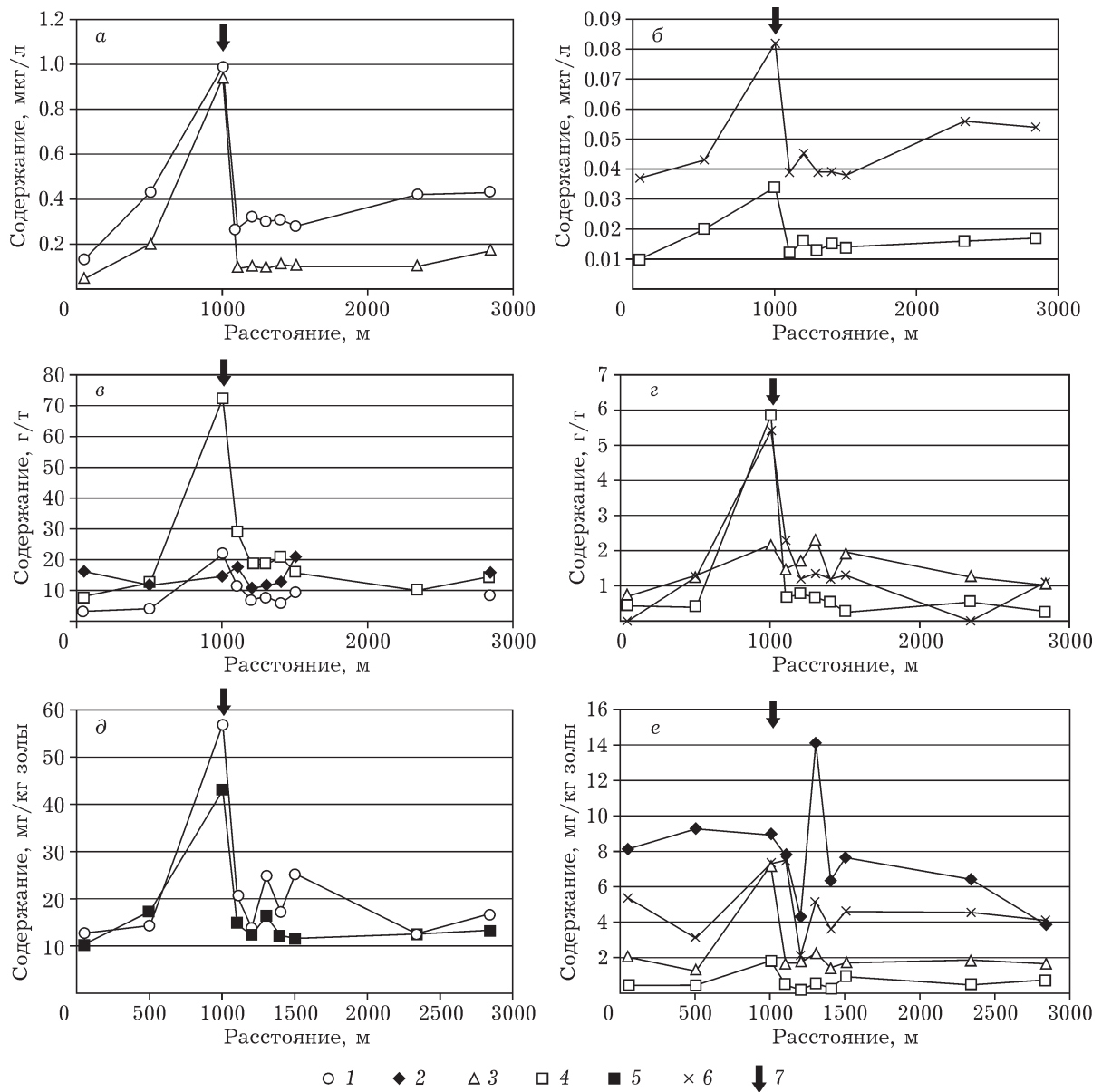


Рис. 5. Содержание естественных радионуклидов и микроэлементов в воде (а, б), прибрежном мелкозерном аллювии (<3 мм) (в, г) и в водных мхах (д, е) р. Русской: 1 – U, 2 – Th, 3 – Mo, 4 – Sb, 5 – As, 6 – Tl, 7 – место впадения ручья в р. Русскую; на оси X указано расстояние от т. 1 (см. рис. 1, г) вниз по течению реки.

значение Th/U составляет всего 0.04. Это связано с более высокими концентрациями урана в ручье вследствие его значительно-го поступления из отвала золотоурановых руд и более высокой водной подвижности этого элемента по сравнению с торием.

В аллювии верховья ручья выше отвала соотношение Th/U ~ 1.8, что сопоставимо с таковым для вмещающих пород (1.7–2.4). Ниже отвала соотношение Th/U резко уменьшается до 0.17–0.24 и близко к величине Th/U,

характерному для самого отвала, что указывает на механический снос мелкозема водными потоками.

Пробы отвала характеризуются практически одинаковыми отношениями Th/U и Th/Ra. В случае проб аллювиальных отложений наблюдается более пологая кривая Th/Ra по сравнению с кривой Th/U (см. рис. 6, а). По данным СГС, соотношение Th/Ra = 0.45, что в среднем почти вдвое выше соотношения Th/U. Соотношение активностей радио-

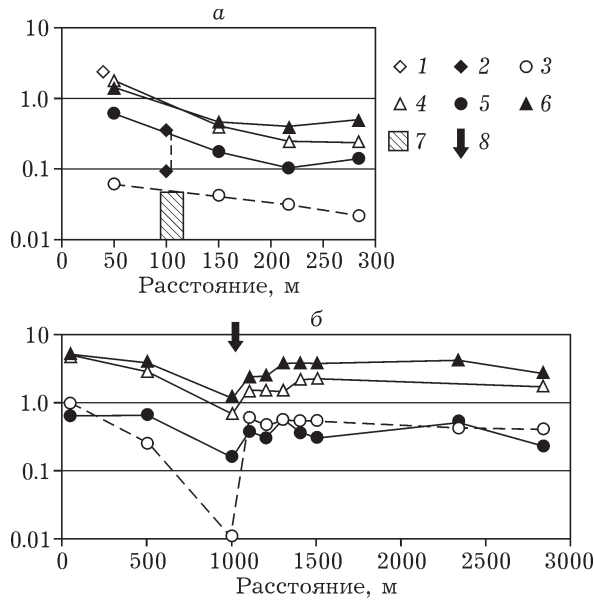


Рис. 6. Соотношение содержаний Th/U и Th/Ra в компонентах природной среды ручья (а) и р. Русской (б): 1–5 – соотношение Th/U во вмещающих породах (1), в отвале (2), в воде (3), в аллювии (мелкоземе) (4), в золе водных мхов (5); 6 – соотношение Th/Ra в аллювии (мелкоземе); 7 – отвал; 8 – место впадения вод ручья в р. Русскую.

нуклидов  $^{238}\text{U}/^{226}\text{Ra}$  в пробах аллювиальных отложений ручья изменяется от 0.41 до 0.74 (рис. 7, а, б).

Таким образом, данные о соотношениях содержаний Th/U, Th/Ra и соотношениях активностей изотопов  $^{238}\text{U}/^{226}\text{Ra}$  указывают на высокую водную подвижность урана. Очевидно, что ниже отвала из аллювиального материала (как и из отвала) продолжается интенсивный водный вынос урана на фоне параллельно идущего процесса накопления урана, других ЕРЭ и халькофильных элементов в аллювии за счет механического сноса. Среднее соотношение активностей радионуклидов  $^{210}\text{Pb}/^{226}\text{Ra}$  выше отвала составляет 0.67, а ниже отвала – 0.74, что указывает на активную эманацию радона из аллювия.

За счет чего обогащаются водные мхи водотоков ЕРЭ и халькофильными элементами? В случае, если бы водные мхи преимущественно накапливали микродисперсные взвешенные частицы, то соотношение Th/U должно было быть практически одинаковым с соотношением Th/U для аллювиального мелкозема. Однако для водных мхов оно составляет всего ~0.14, что примерно в 2.5 раза меньше по

сравнению с величиной Th/U для аллювиальных отложений, но примерно в 4.5 раза выше по сравнению с таковым для проб воды (см. рис. 6, а). Данные о том, что подвижные в воде U, Mo и As накапливаются в больших количествах, нежели Th, позволяют предположить, что водные мхи преимущественно сорбируют растворенные и коллоидные формы этих элементов. Вопрос о механизме связывания элементов в водных мхах пока остается открытым.

В компонентах р. Русской соотношение Th/U практически одинаковое на всем ее протяжении, за исключением места впадения в нее ручья: здесь наблюдается резкий минимум этой величины (см. рис. 6, б).

В отличие от вод и водных мхов ручья, средние соотношения Th/U в пробах воды и водных мхов р. Русской, за исключением места впадения ручья, очень близки между собой (0.53 и 0.44 соответственно). Возможно, это обусловлено значительно более низкими содержаниями урана в речной воде, за исключением места впадения ручья (см. рис. 6, б). Со стоками ручья привносится большое количество урана, что способствует снижению соотношения Th/U в пробах воды до 0.01, а в пробах водных мхов – до 0.16. Полученные данные практически совпадают с таковыми для проб вод ручья ниже отвала.

В пробах мелкоземных аллювиальных отложений верхнего течения р. Русской соотношение Th/U кларковое и равно 5.05. В месте впадения ручья соотношение Th/U в пробах аллювия резко снижается до 0.67, но в два раза превышает соотношение Th/U для пробы аллювиальных отложений ручья ниже отвала. Среднее значение Th/U в аллювии р. Русской (за исключением т. 3 – места впадения ручья) равно 2.07, Th/Ra = 3.56, среднее соотношение активностей  $^{238}\text{U}/^{226}\text{Ra}$  = 0.92,  $^{210}\text{Pb}/^{226}\text{Ra}$  = 1.11 (см. рис. 6, б и 7, в, г). Таким образом, в аллювиальных отложениях р. Русской при низких содержаниях урана устанавливается практически равновесное состояние  $^{238}\text{U}/^{226}\text{Ra}$ ,  $^{210}\text{Pb}/^{226}\text{Ra}$ : 1) происходит очень слабый водный вынос урана, способствующий накоплению более инертного радия; 2) в условиях большой толщи речной воды и относительно низких скоростей течения отсутствует интенсивная эманация радона и на-

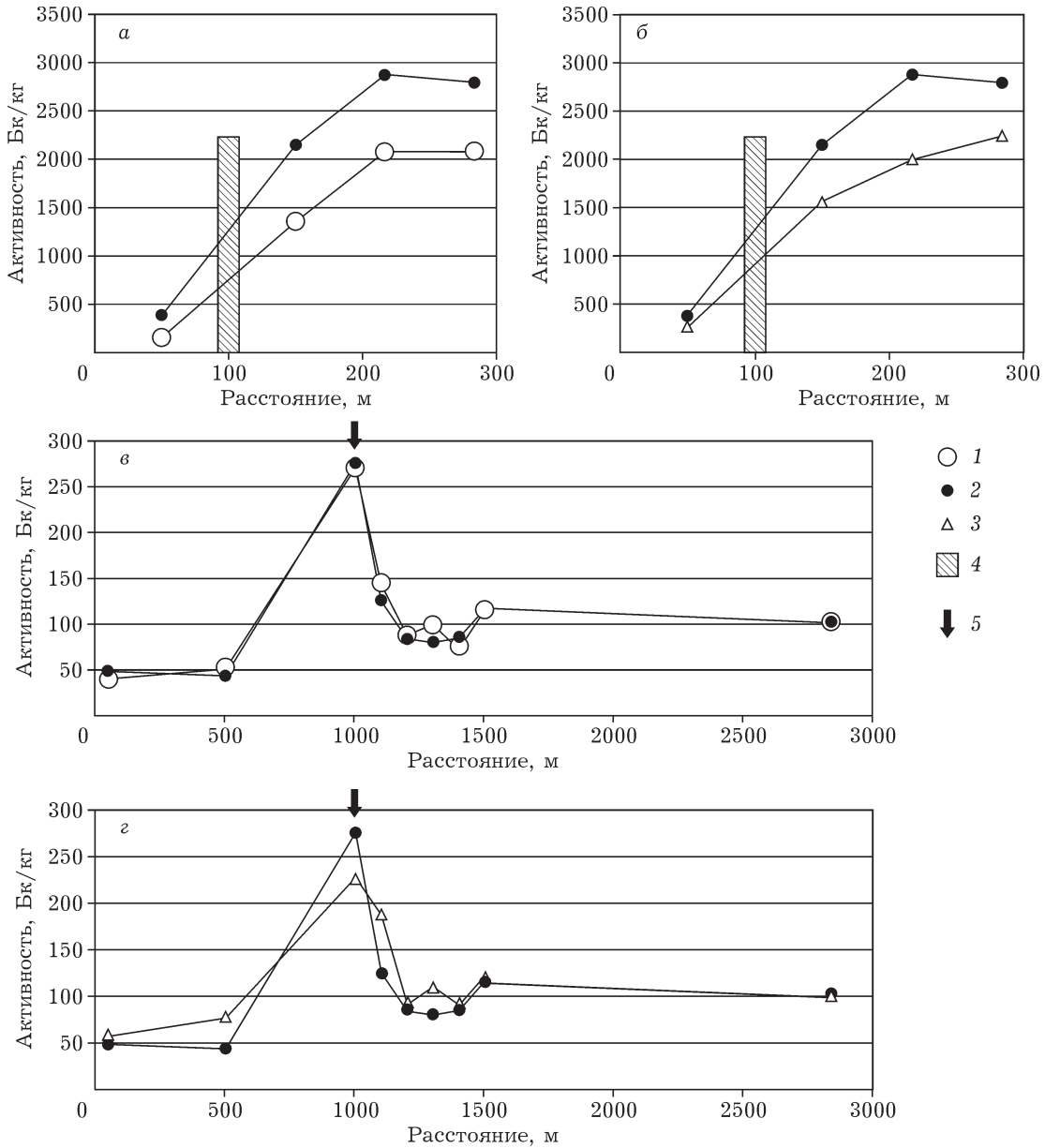


Рис. 7. Данные по активности  $^{238}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  в аллювиальных отложениях ручья, дренирующего радиоактивный отвал (а, б), и р. Русской (в, г): 1 -  $^{238}\text{U}$ , 2 -  $^{226}\text{Ra}$ , 3 -  $^{210}\text{Pb}$ , 4 - отвал, 5 - место впадения ручья в р. Русскую.

блюдается слабая тенденция к его накоплению в аллювии.

В пробах аллювиальных отложений, отобранных в месте впадения ручья в р. Русскую, соотношение  $^{238}\text{U}/^{226}\text{Ra} = 0.98$ , что указывает на привнос ЕРЭ преимущественно за счет механического сноса. Соотношение  $^{210}\text{Pb}/^{226}\text{Ra}$  здесь составляет 0.83, что отражает повышение эманации радона в этом месте.

Таким образом, вода и водные растения р. Русской обогащаются ураном и халькофильными элементами за счет массопереноса растворенных и коллоидных форм этих элементов и их сорбции. В аллювиальных отложениях р. Русской содержание ЕРЭ и халькофильных элементов возрастает в основном за счет выноса обломочного материала со стоками ручья.

## ВЫВОДЫ

1. Отвалы горных выработок в верховье р. Русской Эльконского горста сложены обломками рудных и околорудных калийных метасоматитов, состоящих из калиевого полевого шпата (адуляра), кварца, плагиоклазов; в малых количествах присутствует пренит, пирит, серицит, гипергенный ярозит и другие окисленные рудные фазы. Измеренные мощности экспозиционной дозы  $\gamma$ -излучения на отвале составили от 50 до 800 мкР/ч. Содержание урана в отвале изменяется в широком диапазоне: в рудных метасоматитах – от 500 до 12 000 г/т, в околорудных метасоматитах – от 100 до 150 г/т. Содержание тория варьирует в пределах 30–200 г/т. Запасы урана в отвале оцениваются в 15–70 т, а запасы тория не превышают 5–8 т при плотности породы 2,6 г/см<sup>3</sup> и пористости рыхлого материала отвалов, примерно равной 30 %. Во вмещающих породах содержание урана составляет около 4 г/т, тория – 9 г/т. Кроме того, выявлен комплекс халькофильных элементов-спутников золотого оруденения, включая токсичные. Установлены следующие данные по их содержанию, г/т: Sb 16–130, Te 0,9–6,6, As 180–330, Tl 18–170, Hg 2–3, Mo 25,7–109, Cu 160–360, Pb 30–540.

2. В условиях резко континентального климата идет выветривание золотоурановых рудных и околорудных метасоматитов в отвале, наблюдается активная миграция урана с водными потоками, эманация радона, что приводит к смещению радиоактивного равновесия  $^{238}\text{U}/^{226}\text{Ra}$ ,  $^{210}\text{Pb}/^{226}\text{Ra}$ .

3. На кристаллических архейских гранитоидах Эльконского горста формируются ультрапресные (до 65 мг/л) слабокислые и нейтральные (с рН 5,5–6) поверхностные воды, которые при дренаже отвалов золотоурановых отвалов обогащаются сульфатами, ураном, молибденом, сурьмой, таллием и в меньшей степени – торием и мышьяком. На расстоянии первых сотен метров ниже отвалов в дренажных водах выявляются повышенные концентрации этих элементов по сравнению с их концентрациями в верхнем бьефе водотока (выше дренируемых отвалов). Необходимо отметить, что в целом для прирудных вод района в местных природно-кли-

матических условиях характерны весьма низкие концентрации изученных токсичных и радиоактивных элементов (намного ниже существующих норм ПДК и УВ).

4. В местных условиях горно-таежных ландшафтов механический снос вещества с отвалов преобладает над миграцией элементов в растворенной и коллоидной формах, что подтверждается результатами изотопного анализа. Механический снос особо доминирует в массопереносе мышьяка и тория.

5. Источники (родники), вскрытые горными выработками, и, возможно, некоторые естественные выходы подземных вод в пределах золотоуранового месторождения Эльконского горста поставляют уран и ряд токсичных халькофильных элементов в поверхностные водотоки, подобно дренажным стокам радиоактивных отвалов.

6. Водные мхи на прибрежных камнях водотоков служат своеобразным органо-геохимическим барьером, который накапливает в своих тканях уран и целый комплекс халькофильных элементов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Научно-прикладной справочник по климату СССР. Сер. 3. Многолетние данные. Ч. 1–6, Вып. 24. Якутская АССР. Кн. 1. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 607 с.
- 2 Федоров А. Н., Ботулу Т. А., Варламов С. П., Васильев И. С., Грибанова С. П., Дорофеев И. В., Климовский И. В., Самсонова В. В., Соловьев П. А. Мерзлотные ландшафты Якутии (пояснительная записка к “Мерзлотно-ландшафтной карте Якутской АССР масштаба 1 : 2 500 000”). Новосибирск: ГУГК, 1989. 170 с.
- 3 Крупенников В. А. Урановые (браннеритовые) месторождения в разломах фундамента эпиархейских кратонов // Гидротермальные месторождения урана. М.: Недра, 1978. С. 128–138.
- 4 Титов В. К. // Промышленные типы урановых месторождений и методика их поисков. Л.: Недра, 1984. С. 63–69.
- 5 Наумов С. С., Шумилин М. В. // Отечественная геология. 1994. №11/12. С. 20–23.
- 6 Бойцов В. Е., Пилипенко Г. А., Солодов Н. А. Месторождения благородных, радиоактивных и редких металлов. Москва: НИИ-Природа, 1999. С. 146–159.
- 7 Терентьев В. М., Казанский В. И. // Региональная геология и металлогения. 1999. № 8. С. 47–58.
- 8 Инструкция по геохимическим методам поисков рудных месторождений. М.: Недра, 1965. 227 с.
- 9 Методические рекомендации по проведению полевых и лабораторных исследований почв и растений при контроле загрязнения окружающей среды металлами / Под ред. Н. Г. Зырина, С. Г. Малахова. М.: Гидрометеиздат, 1981. 109 с.

- 10 Бобров В. А., Гофман А. М. Лабораторный гамма-спектрометрический анализ естественных радиоактивных элементов (методические разработки). Новосибирск: Ин-т геологии и геофизики СО АН СССР, 1971. 67 с.
- 11 Мельгунов М.С., Гавшин В. М., Сухоруков Ф. В., Калугин И. А., Бобров В. А., Klerkx J. // *Химия уст. разв.* 2003. Т. 11, № 6. С. 869–880.
- 12 Артамонова С. Ю., Колмогоров Ю. П. // *Поверхность.* 2005. № 9. С. 16–20.
- 13 Tessier A., Cambell P. G. C., Bisson M. // *Anal. Chem.* 1979. Vol. 51, Issue 7. P. 256–273.
- 14 *Treatise on Geochemistry* / К. К. Turekian, Н. D. Holland (Eds.). Elsevier Sci., 2003. 7800 p. ISBN-10: 0080437516.