

### Литература

1. Мухин В.М., Соловьев С.Н., Гутникова М.А. Новые сорбенты для эффективного поглощения радионуклидов в системах СГО атомных электростанций. – Н. Новгород : Атомный проект, 2010. – С. 77

2. Мухин В.М., Клушин В.Н. Производство и применение углеродных адсорбентов. – М. : РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2012. – 308 с.

## ТОРИЙ, УРАН И ЗОЛОТО В ПОТОКЕ РАССЕЙНИЯ УРСКОГО ХВОСТОХРАНИЛИЩА

И.Н. Мягкая<sup>1,2</sup>, Е.В. Лазарева<sup>1</sup>, Б.Ю. Сарыг-оол<sup>1</sup>, М.А. Густайтис<sup>1,3</sup>, С.М. Жмодик<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, i\_myagkaya@igm.nsc.ru

<sup>2</sup>Томский политехнический университет, Томск, <sup>3</sup>Новосибирский государственный университет, Новосибирск

## THORIUM, URANIUM AND GOLD IN THE DESPERATION TRAIN OF URSK TAILING PIT

I.N. Myagkaya<sup>1,2</sup>, E.V. Lazareva<sup>1</sup>, B.Yu. Saryg-ool<sup>1</sup>, M.A. Gustaytis<sup>1,3</sup>, S.M. Zhmodik<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Sobolev Institute of geology and mineralogy, Siberian Branch, RAS, Novosibirsk

<sup>2</sup>Tomsk Polytechnic University, Tomsk

<sup>3</sup>Novosibirsk State University, Novosibirsk

На примере торфов, перекрытых материалом, образовавшимся за счет экзогенных продуктов изменения отходов обогащения, из потока рассеяния Урского хвостохранилища, рассмотрены содержания и формы нахождения Th, U, Au. Установлено, что в торфах происходит накопление U (0,5–19 г/т), Th (0,9–11 г/т) и Au (0,03–35 г/т). Определены 4 формы их нахождения: водорастворимая, окисляемая, восстанавливаемая и остаточная. Th преимущественно связан в остаточной фракцией; U – с водорастворимой и окисляемой; Au – с окисляемой и остаточной.

The content and speciation of Th, U, Au were considered on the example of peat, covered by material, forming due to an exogenous alteration products of tailings from the desperation train of Ursk tailing pit. It was found that an accumulation of U (0,5–19 g/t), Th (0,9–11 g/t) and Au (0,03 to 35 g/t) occur in peats. Four speciation were identified: water-soluble, oxidizable, reducible and residual. Th mainly bound in the residual fraction; U – with water-soluble and oxidizable; Au – oxidizable and residual.

### Введение и объект исследования

Хвостохранилища привлекают внимание исследователей из-за неблагоприятных обстановок, возникающих на прилегающих к ним территориях [3, 7, 8, 20, 23]. При построении рекультивационных систем торф предлагается как сорбент для тяжелых металлов, что обусловлено его ролью как геохимического барьера [22]. Еще торф можно рассматривать как прототип угленосных месторождений [19] с высокими содержаниями U, Th [6], благородных металлов [24] и др.

Формы нахождения элементов в веществе позволяют судить об их миграционной способности, о связи с веществом, биодоступности и способах извлечения и консервации. Для их изучения применяется методика ступенчатого выщелачивания. Первые схемы появились в 1960–1970 гг. для определения форм нахождения тяжелых металлов в донных отложениях, тонкодисперсное и рентгеноаморфное состояние которых затрудняло минералогические исследования. За последние годы предложены и опробованы десятки схем, отличающиеся разной последовательностью извлечения фракций и условиями проведения (температура, pH, время воздействия, концентрация и тип реагента) [9]. Методики стали применяться для различных веществ: почвы, торфа; отходы хвостохранилищ; современные и древние осадочные породы; морские осадки. Одна из основополагающих методик – 5-ступенчатая схема (ионообменная,

кислоторастворимая, восстанавливаемая, окисляемая фракции и остаток), разработанная А. Tessier [26], с широким спектром применения, как для почв, так и для осадков. Эта методика в различных вариантах использовалась для многих исследований. Для изучения форм Th и U предлагаются также модифицированные схемы А. Tessier [18, 28]. Универсальных методик извлечения Au нет [10, 12], из-за аналитических сложностей и особенностей изучения веществ различного состава.

Более 80 лет назад в Кемеровской области в п. Урск велась разработка Au-полиметаллических серноколчеданных руд Ново-Урского месторождения (Урское рудное поле). Складирование отходов цианирования привело к формированию Урского хвостохранилища [11, 21]. Отходы складировались в естественном логу, где в его верхней части расположен затопленный карьер и породные отвалы. Последние обрамлены двумя самостоятельными отвалами высотой 10–12 м, сложенными отходами первичных руд и отходами руд зоны окисления [14]. Отходы никак не закреплены и в течение всего времени существования хранилища разносятся по окружающей территории. Вещество отвалов отходов первичных руд в большей степени обогащено Cu, Zn, Se, Cd, Sn, Sb, Te, Ba, Hg, Pb, Ag и Au по сравнению с отходами руд зоны окисления, где преобладают Na, Mg, Al, Si, K, Ca, Ti и Fe. Природный ручей, дренируя отвалы, превращается в сильноокислый (pH 1,9, Eh 655 мВ) дренажный

ручей с высоким содержанием элементов: 270 мг/л Al; 780 мг/л Fe; 2,5 мг/л Cu; 11 мг/л Zn; 11,4 мкг/л Hg; 1,2 мкг/л Au; 21 мкг/л Th; 24 мкг/л U и др. [15]. Геофизические данные показали, что существует 2 основных направления миграции техногенных растворов [17]. Ниже по направлению сноса расположен заболоченный торфяник, подверженный воздействию дренажных вод и отходов обогащения. Последние перекрывают заболоченный поток рассеяния, но на поверхности местами сохранились остатки болотных кочек. Ранее установлено активное концентрирование элементов торфом из потока рассеяния [16].

Исследование форм нахождения и особенностей концентрирования элементов современными торфяниками дают информацию о роли углеродистого вещества в накоплении радиоактивных и благородных элементов из растворов различной природы на ранних стадиях формирования рудных концентраций в низкотемпературных поверхностных условиях. Цель – выявить особенности накопления и формы нахождения U, Th вместе с Au в веществе потока рассеяния.

### Методы исследования

Для проведения исследования опробовано 3 шурфа глубиной ~0,6 м, располагающиеся в 3 разных частях потока рассеяния:

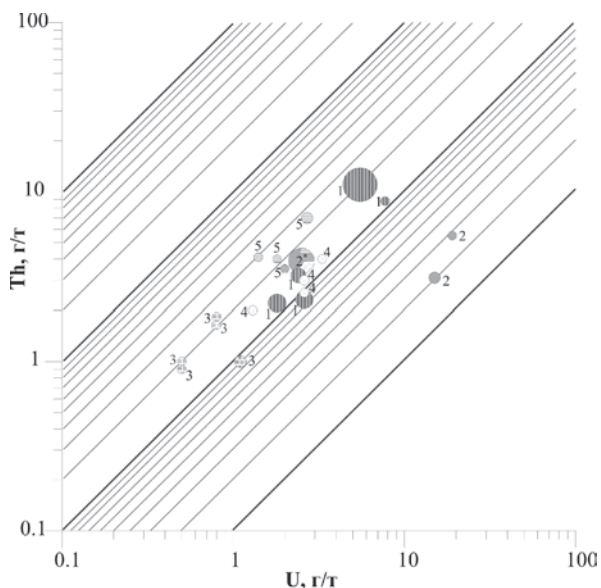
- 1) область, покрытая отходами первичных руд;
- 2) область напротив складированных отвалов руд зоны окисления;
- 3) область переслаивания снесенных отходов обоих типов, расположенная вблизи основного русла дренажного ручья. Отобранное вещество представлено снесенными отходами, торфом болотных кочек и торфом, захороненным под отходами.

Вещество высушено до воздушно-сухого состояния, гомогенизировано. Содержания Th, U и Au определялись ИНАА (аналитик В.С. Пархоменко, ИГМ СО РАН), используя многоканальный спектрометрический анализатор PCA III-4000, (плата в составе IBM PC; фирма Oxford Instruments Inc.). Навеска – 150–200 мг. Для выявления форм нахождения обсуждаемых элементов к торфу потока рассеяния применялась модифицированная методика А. Tessier [26], по которой дополнительно извлекалась водорастворимая фракция [8], принимая во внимание тот факт, что в поверхностных условиях Урского хвостохранилища формируются вторичные минералы (сульфатные выцветы). Не проводилось выделение ионообменной фракции, чтобы не разрушить органическую составляющую, поскольку наиболее важной задачей данной работы являлось изучение процессов сорбции на органическом веществе. Также не извлекалась кислоторастворимая фракция (карбонатная), т.к. известно, что в кислой среде, преобладающей на территории хвостохранилища (рН дренажных растворов 1,9), существование карбонатов весьма затруднительно. В зоне окисления сульфидов основная часть карбонатов устойчива при рН >4 [1]. Экстрагирование фракции, связанной с органическим веществом (окисляемая фракция), производилось перед извлечением фракции, свя-

занной с гидроксидами железа (восстанавливаемая) [13], поскольку при очень низких значениях рН среды может произойти частичное экстрагирование элементов, связанных с органическим веществом. Выщелачивались: водорастворимая (H<sub>2</sub>O, 24 ч); окисляемая (H<sub>2</sub>O, HNO<sub>3(конц)</sub>, песчаная баня); восстанавливаемая (NH<sub>2</sub>OH·HCl в 25% HOAc рН=2–3; Т=3 ч; t=90±2 °С); остаток (HF, HNO<sub>3(конц)</sub>, HClO<sub>4</sub>, HCl (1:1), 5% HCl). Аликвоты проанализированы методом ICP-MS на приборе Agilent 7700 (фирма Agilent Technologies) согласно методике НСАМ № 480-Х [2] (аналитический центр “Плазма”, Томск).

### Обсуждение результатов

Валовые содержания в снесенных отходах варьируют в небольшом диапазоне 2–7 г/т U и 1,3–3,3 г/т Th, что существенно отличается от торфа (0,5–19 г/т U и 0,9–11 г/т Th), контактирующего с дренажными водами и отходами. Содержания Au имеют такую же закономерность – в отходах 0,19–3,1 г/т, в торфе 0,03–35 г/т. В одном погребенном слое отходов содержание Au составило 30,4 г/т (точка 5, рис. 1). По соотношению типа вещества и содержаний Th, U и Au выделяется 5 групп (рис. 1). На рисунке 1 (точки 1, 2, 2\*) видно, что процесс аккумуляции Au вместе с Th и U происходит активнее в торфах, которые контактируют с отходами. Содержания Au, Th и U в песчаном и илистом веществе отходов близки (рис. 1, точки 4 и 5). Обогащение торфа настолько сильное, что содержания Th и U в 4–5 раз выше средних со-



**Рис. 1.** Соотношения содержаний Th, U, Au в разных типах вещества потока рассеяния: 1 – вещество болотных кочек; 2 – захороненный торф на контакте с отходами; 2\* – смесь 2 и 4 с 5; 3 – захороненный торф, не контактирующий с отходами; 4 – песчаное вещество отходов; 5 – илистое вещество отходов. Размер баблов отвечает содержанию Au (от 0,03 до 35 г/т)

держаний в разных типах (низинной, верховой и переходной) торфов Западно-Сибирской платформы, которые не подвержены техногенному влиянию. В них установлены весьма низкие содержания – 0,09–3,9 г/т U и 0,21–2,9 г/т Th, 0,0006–0,16 г/т Au [4–6]. Кларки верхней земной коре – 2,8 г/т U, 10,7 г/т Th, 0,0018 г/т Au [25]. С.И. Арбузовым [4] отмечено, что углефикация этих не столь обогащенных торфов приводит к формированию обогащенных угленосных месторождений. Если бы торфа потока рассеяния Урского хвостохранилища были подвержены углефикации, то, как предполагается, содержания увеличились бы до аномальных значений.

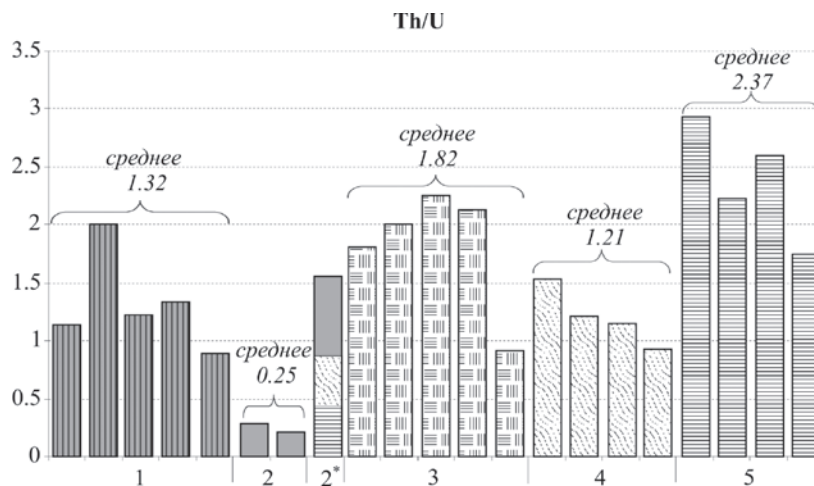
Th/U-отношения в потоке рассеяния в среднем – 0,25–2,37 (рис. 2), занимая промежуточное положение среди торфов Западной Сибири – 0,5–3,3 [6]. Пониженные Th/U отношения в торфах указывают на более активную сорбцию U, т.к. он обладает большей мобильностью в поверхностных условиях, о чем дополнительно свидетельствуют формы нахождения (рис. 3). В илстом веществе отходов Th/U отношения максимальны и мо-

гут быть связаны с тем, что данный тип вещества, обладая низкой проницаемостью, насыщен U за счет вклада дренажных вод.

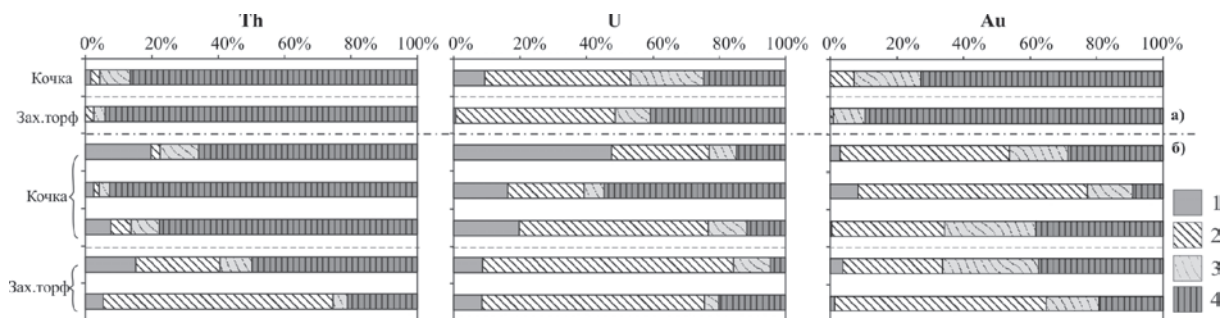
Валовые содержания, рассчитанные по сумме фракций выщелачивания, отличаются от данных ИННА в меньшую сторону, поэтому для описания закономерностей форм нахождения используются только доли выхода от валового содержания. Торий в торфе частично связан с водорастворимыми соединениями (рис. 3), среди которых в условиях Урского хвостохранилища наиболее распространенными являются сульфаты. Также на этом этапе могут растворяться легкорастворимые органические соединения. Преобладает Th в веществе болотных кочек (доля выхода 1,7–20%), а также в верхней части захороненного торфа, взаимодействующего с веществом снесенных отходов обогащения (доля выхода 15,3%). В захороненном торфе, не контактирующем с отходами, доля данной фракции составляет 0,17–5,5%. Вытяжка, получаемая при взаимодействии торфяного вещества и дистиллированной воды на данном этапе

фракционирования, получается кислой (с pH 2,4–3,1) за счет того, что торф пропитан кислыми дренажными водами. Поэтому присутствие Th в данной фракции отражает его мобильность в кислых поверхностных условиях.

Достаточно неоднородно Th распределен в окисляемой фракции (рис. 3), наличие которой отражает совместное растворение сульфидов и органического вещества. Доля выхода элемента 1,6–70% и максимум характерен для наиболее захороненного торфяного горизонта, не контактирующего с отходами. В приповерхностном веществе болотных кочек доля окисляемой фракции Th составляет 1,6–6%, увеличиваясь по мере захоронения кочки. Содержания Th в восстанавливаемой фракции наиболее высоко в тех торфяных сло-



**Рис. 2.** Th/U отношения в разных типах вещества потока рассеяния: 1 – вещество болотных кочек; 2 – захороненный торф на контакте с отходами; 2\* – смесь 2 и 4 с 5; 3 – захороненный торф не контактирующий с отходами; 4 – песчаное вещество отходов; 5 – илстое вещество отходов



**Рис. 3.** Формы нахождения элементов в торфах на примере вертикального разреза из области отходов руд зоны окисления (а) и торфов взаимодействующих как с отходами первичных руд, так и руд зоны окисления (б): 1 – водорастворимая фракция; 2 – окисляемая; 3 – восстанавливаемая; 4 – остаток

ях, что взаимодействуют с отходами (рис. 3), что вполне логично, поскольку на контакте торфа и отходов происходят процессы переотложения и формирование вторичных оксидов и гидроксидов Fe [15]. Доля выхода составляет от 3 до 12% (рис. 3). Относительно восстанавливаемой фракции Th существуют данные, что он может быть связан с оксидами и гидроксидами Mn и Fe, но доля его совсем не велика [28], что согласуется также с нашим исследованием. Преимущественно Th выщелачивается с минералами устойчивыми к химическому выветриванию (различные алюмосиликаты), т.е. с остаточной фракцией (рис. 3). Доля выхода от 21 до 94%, минимум в захороненном торфе, максимум на контактах с отходами. Полученные нами данные согласуются с тем фактом, что элемент имеет одну степень окисления +IV, что способствует формированию его труднорастворимых соединений. Подобная ситуация отмечается в почвах. В работах по извлечению остаточной фракции Th предлагается использовать разбавленную азотную кислоту с молярностью 4–7 М. Но при этом указывается, что не весь остаток растворяется [28], а, следовательно, и не весь элемент выходит. В нашем случае, применялась смесь минеральных кислот, что позволяет с большей достоверностью относиться к полученным данным.

Уран, как и Th, частично выщелачивается на стадии водорастворимых соединений (рис. 3). При этом доля выхода U выше – 0,8–48%. Самые высокие доли U в этой фракции отмечаются в веществе болотной кочки – 9,5–48%, тогда как самые низкие в захороненном торфе (0,7–8,6%). Наличие водорастворимых фракций U, показывает, что элемент присутствует как U(VI) в виде уранил-иона  $UO_2^{2+}$  и слабо адсорбированных U-содержащих разновидностей, отражая наличие кислой окислительной среды [27]. Окисляемая фракция U одна из доминирующих по доле выхода элемента, которая распределена относительно одинаково во всех пробах и в среднем составляет 50% (рис. 3). Максимальная доля в 48–75% в захороненных торфах. Сорбция гидроксидами/оксидами Fe/Mn в отношении U также наблюдается в условиях торфа потока рассеяния хвостохранилища (рис. 3). Доля выхода не столь высокая, как у предшествующей стадии. Остаточная фракция U распределена не однородно (рис. 3) и, по-видимому, отражает нахождение U в виде примесей в труднорастворимых алюмосиликатах.

Связь золота с водорастворимыми соединениями (рис. 3; до 8% от валового содержания) отражает его присутствие в виде тиосульфатных и полиитонатных комплексов. Высокая доля окисляемой фракции (до 69%) связана с формированием золотосодержащих органокомплексов и вхождение элемента в качестве примеси во вторичные сульфиды. Согласно минералогическим исследованиям, самородное золото связано с органическим веществом, обильно покрытым вторичными соединениями Fe(III) [16]. Следовательно, можно ожидать, что некоторая часть Au связана с органическим веществом, хотя применяемая методика и не позволяет разделить золото, связанное с органическими соединениями и с сульфидами. Следует отметить, что некоторая часть металла (до 29% от валового содержания)

связана с гидроксидами Fe за счет сорбции. Последняя стадия выщелачивания отражает наличие самородного золота. В торфе, взаимодействующем с отходами рудной зоны окисления доля остаточной фракции Au наибольшая (73–89%) в отличие от вещества, контактирующего с обоими типами отходов (максимум 38%). Однако количество самородных частиц никак не отвечает высоким содержаниям золота в пробах, что, скорее всего, связано с процессами перераспределения и переотложения в ходе выщелачивания.

## Заключение

В торфах, подверженных техногенному воздействию, происходит накопление U (0,5–19 г/т), Th (0,9–11 г/т) и Au (0,03–35 г/т) активнее, чем в торфах Западной Сибири, удаленных от рудных объектов. Накопление U более активно, чем Th, о чем свидетельствуют пониженные Th/U и преобладающие формы нахождения. В торфах определены 4 формы нахождения – водорастворимая, окисляемая, восстанавливаемая и остаточная. Первые 3 – наиболее мобильны и биодоступны. Th в основном связан с остаточной фракцией; U – с водорастворимой и окисляемой; Au – с окисляемой и остаточной. На основании проведенных работ можно сделать важные практические выводы: отложения углеродных бассейнов, в частности Кузнецкого бассейна, окруженные горными сооружениями с Au-содержащими коренными источниками, могут рассматриваться в качестве новых, перспективных районов для поисков месторождений Au нетрадиционного типа; установленная высокая миграционная способность Th в изученных поверхностных условиях объясняет возникновение экзогенных ториевых аномалий. Неполное соответствие валовых концентраций U, Th, Au и расчетных данных (сумма концентраций U, Th, Au во фракциях) указывает на необходимость применения инструментальных методов анализа (в частности ИНАА) элементов-примесей в углеродсодержащих породах и рудах.

*Экспедиционные и геохимические работы выполнены в рамках государственного задания (проект № VIII.72,2,3(0330–2014–0016)) в “ЦКП Многоэлементных и изотопных исследований СО РАН”. Также выполнение работы поддержано РФФИ № 16–35–60108 мол\_а\_дк, 15–05–05362, 15–35–21024. Аликвоты проанализированы при поддержке РНФ 15–17–10011.*

## Литература

1. Гаррелс Р.М., Крайт Ч.Л. Растворы, минералы, равновесия. – М.: Мир, 1968. – 367 с.
2. Методика ИСАМ № 480-Х “Методика количественного химического анализа. Определение элементного состава природных и питьевых вод методом ICP-MS”. – М., 2002.
3. Assessment of the acid mine drainage potential of waste rocks at the Ak-Sug porphyry Cu-Mo deposit / N. Abrosimova, O. Gaskova, A. Loshkareva et al. // J. Geochem. Expl. – 2015. – [Vol.] 157. – P. 1–14.
4. Modes of occurrence of uranium and thorium in coals and peats of Northern Asia / S.I. Arbuzov, S.G. Maslov,

- A.V. Volostnov et al. // *Solid Fuel Chem.* – 2012. – [Vol.] 46(1). – P. 52–66.
5. *Anomalous gold contents in brown coals and peat in the south-eastern region of the Western-Siberian platform / S.I. Arbutov, L.P. Rikhvanov, S.G. Maslov et al. // Inter.J.Coal Geol.* – 2006. – [Vol.] 68. – P. 127–134.
  6. *Geochemistry of radioactive elements (U, Th) in coal and peat of northern Asia (Siberia, Russian Far East, Kazakhstan, and Mongolia) / S.I. Arbutov, A.V. Volostnov, L.P. Rikhvanov et al. // Inter.J.Coal Geol.* – 2011. – [Vol.] 86. – P. 318–328.
  7. *Characterization of the acid mine drainage microbial community using culturing and direct sequencing techniques / R.R. Auld, M. Myre, N.C.S. Mykytczuk et al. // J. Microbiol. Meth.* – 2013 – [Vol.] 93(2). – P. 108–115.
  8. *Dold B. Speciation of the most soluble phases in a sequential extraction procedure adapted for geochemical studies of copper sulfide mine waste // J. Geochem. Expl.* – 2003. – [Vol.] 80(1). – P. 55–68.
  9. *Gleyzes C., Tellier S., Astruc M. Fractionation studies of trace elements in contaminated soils and sediments: a review of sequential extraction procedures // Trend. analyt. chem.* – 2002. – [Vol.] 21(6–7). – P. 451–467.
  10. *Gray D.J., Wildman J.E., Longman G.D. Selective and partial extraction analyses of transported overburden for gold exploration in the Yilgarn Craton, Western Australia // J. Geochem. Expl.* – 1999. – [Vol.] 67. – P. 51–66.
  11. *Distribution of mercury and its species in the zone of sulphide tailing / M.A. Gustaitis, E.V. Lazareva, A.A. Bogush et al. // Dok. Earth Sci.* – 2010. – [Vol.] 432(2). – P. 778–782.
  12. *Hall G.E.M., MacLaurin A.I., Vaive J.E. Readsorption of gold during the selective extraction of the "soluble organic" phase of humus, soil and sediment samples // J. Geochem. Expl.* – 1995. – [Vol.] 54. – P. 27–38.
  13. *McLaren R.G., Crawford D.W. Studies on soil copper I. The fraction of copper in soils // Eur. J. Soil Sci.* – 1973. – [Vol.] 4. – P. 172–181.
  14. *Gold in the sulfide waste-peat bog system as a behavior model in geological processes / I.N. Myagkaya, E.V. Lazareva, M.A. Gustaitis et al. // Dok. Earth Sci.* – 2013. – [Vol.] 453(1). – P. 1132–1136.
  15. *Gold and silver in a system of sulfide tailings. Part 1: Migration in water flow / I.N. Myagkaya, E.V. Lazareva, M.A. Gustaitis et al. // J. Geochem. Expl.* – 2016. – [Vol.] 160. – P. 16–30.
  16. *Gold and Silver in a System of Sulfide Tailings. Part 2: Reprecipitation on natural peat / I.N. Myagkaya, E.V. Lazareva, M.A. Gustaitis et al. // J. Geochem. Expl.* – 2016. – [Vol.] 165. – P. 8–22.
  17. *Vertical and lateral spreading of highly mineralized acid drainage solutions (Ur dump, Salair): Electrical resistivity tomography and hydrogeochemical data / V.V. Olenchenko, D.O. Kucher, S.B. Bortnikova et al. // Rus. Geol. Geoph.* – 2016. – [Vol.] 57(4). – P. 617–628.
  18. *Optimizing standard sequential extraction protocol with lake and ocean sediments / I. Outola, K. Inn, R. Ford et al. // J. Radioanal. Nucl. Chem.* – 2009. – [Vol.] 282. – P. 321–327.
  19. *Peng G., Zhang Z., Wu D. The study status of correlation of peat with coal-forming environment // Adv. Earth Sci.* – 1999. – [Vol.] 14(3). – P. 1–11.
  20. *Romanova T.E., Shuvaeva O.V. Fractionation of mercury in water hyacinth and pondweed from contaminated area of gold mine tailing // Water, Air, Soil Poll.* – 2016. – [Vol.] 227(6). – P. 171–180.
  21. *Migration of heavy metals (Cu, Pb, Zn, Fe, Cd) in the aureole of scattering at the Urskoye tailing dump (Kemerovo Region) / I.N. Shcherbakova, M.A. Gustaitis, E.V. Lazareva et al. // Chem. Sustain. Develop.* – 2010. – [Vol.] 18. – P. 535–547.
  22. *Sheoran A.S., Sheoran V. Heavy metal removal mechanism of acid mine drainage in wetlands: a critical review // Mineral. Engineer.* – 2006. – [Vol.] 19(2). – P. 105–116.
  23. *Geochemical and mineralogical zoning of high-sulfide mine-waste at the Berikul mine-site, Kemerovo region, Russia / N.V. Sidenko, E.V. Lazareva, S.B. Bortnikova et al. // Can. Mineral.* – 2005. – [Vol.] 43(4). – P. 1141–1156.
  24. *Nonconventional types of noble-, rare-metal, and rare-earth mineralization in coal-bearing basins in the Far East / A.P. Sorokin, V.I. Rozhdestvina, V.M. Kuzminykh et al. // Dok. Earth Sci.* – 2012. – [Vol.] 446(2). – P. 1215–1219.
  25. *Taylor S.R., McLennan S.M. The geochemical evolution of the continental crust // Rev. Geoph.* – 1995. – [Vol.] 33. – P. 241–265.
  26. *Tessier A., Cambell P.G.C., Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals // Anal. Chem.* – 1979. – [Vol.] 51. – P. 844–851.
  27. *Comparison of two sequential extraction procedures for uranium fractionation in contaminated soils / H. Vandenhove, N. Vanhoud, L. Duquene et al. // J. Envir. Radioact.* – 2014. – [Vol.] 137. – P. 1–9.
  28. *Virtanen S., Vaaramaa K., Lehto J. Fractionation of U, Th, Ra and Pb from boreal forest soils by sequential extractions // Appl. Geochem.* – 2013. – [Vol.] 38. – P. 1–9.