

Научная статья
УДК 550.4-550.9
doi: 10.17223/25421379/24/6

СЕЛЕН В ПРИРОДНО-АНТРОПОГЕННЫХ ГЕОСИСТЕМАХ ГОРНОПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕРРИТОРИЙ ЗАБАЙКАЛЬЯ

Георгий Александрович Юргенсон¹, Мария Анатольевна Солодухина²,
Роман Андреевич Филенко³, Лариса Альфредасовна Михайлова⁴



^{1, 2, 3} Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, Чита, Россия

⁴ Читинская государственная медицинская академия, Чита, Россия

¹ yurgga@mail.ru

² mabn@ya.ru

³ filrom@yandex.ru

⁴ mihailova-la@mail.ru

Аннотация. В связи с проблемой селенодефицита в Забайкалье изучение содержания селена в почвах, лежалых хвостах обогащения руд, заполняющих хвостохранилища, и произрастающих здесь растениях является весьма актуальной задачей. Содержание Se в почвах составляет 0,3–3,46 г/т, в хвостах обогащения – от 0,3 до 3,1; в наземных частях растений варьирует от 0,004 до 0,21 г/т. Максимальны содержания его в растениях, произрастающих на почвах (0,02 г/т) и хвостах обогащения руд (0,07–0,21 г/т) олово-полиметаллических месторождений, 0,01–0,03 молибденовых и 0,02–0,04 г/т золоторудных.

Ключевые слова: селен, геосистема, почва, растения, селенодефицит, хвосты обогащения руд, овощи

Источник финансирования: тема № 0309-2021-0005 Сибирского отделения РАН.

Для цитирования: Юргенсон Г.А., Солодухина М.А., Филенко Р.А., Михайлова Л.А. Селен в природно-антропогенных геосистемах горнопромышленных территорий Забайкалья // Геосферные исследования. 2022. № 3. С. 93–108. doi: 10.17223/25421379/24/6

Original article
doi: 10.17223/25421379/23/6

SELENIUM IN NATURAL-ANTHROPOGENIC GEOSYSTEMS OF MINING AREAS OF TRANSBAIKALIA

Georgi A. Yurgenson¹, Mariya A. Solodukhina², Roman A. Filenko³, Larisa A. Mikhailova⁴

^{1, 2, 3} Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology SB RAS, Chita, Russia

⁴ Chita State Medical Academy, Chita, Russia

¹ yurgga@mail.ru

² mabn@ya.ru

³ filrom@yandex.ru

⁴ mihailova-la@mail.ru

Abstract. In connection with the problem of selenium deficiency and the widespread development in Transbaikalia of white muscle disease in domestic ungulates, cardiac arrhythmia and cancer in humans, a comparative study of the selenium content in soils and ore dressing tailings of tailing dumps and plants growing here is very relevant. Selenium is a common companion of sulfur and almost always accompanies it in natural sulfides or creates its own mineral phases. In Transbaikalia, where ore deposits are widespread, the main useful components of which are part of sulfides, which are the main carriers of selenium, selenium deficiency, it would seem, should not be. Therefore, the study of the prevalence of selenium in the region and its distribution in the components of the landscape is very important. On this basis, the object of this work is related components of the landscape: mineral deposits → soil (technosol) → wild plants, vegetables. The subject of the study is the distribution of selenium in these components of landscapes. The results of the study. Selenium minerals are present in the ores of polymetallic, gold-polymetallic, tin-polymetallic, tungsten and molybdenum deposits. Its contents are also found in sulfides (molybdenum, pyrite, chalcopyrite, galena, sphalerite, tetradimite, bismuthin, lillianite, altaite, galenobismuthite, sulfosols) in amounts of 0.000 n–13.8 %. These are mainly hundredths – thousandths of a percent, and they reach their maximum in tetradimite (4.9 %) and galenobismuthite (13.8). However, the prevalence of minerals with relatively high Se content is less than 0.001 % and its main carriers are galena, sphal-

erite, molybdenum and chalcopyrite. The average contents in the ores are (ppm) from 0.5 for pyrite-antimonite-ferberite-quartz ore to 8.0 for molybdenum-chalcopyrite-feldspar-quartz ore with a variation of the concentration coefficient relative to the Clark of the earth's crust from 10 for the W deposits to 160 of the Zhireken Mo deposit. The Se content in soils is 0.3–3.46 ppm with a concentration coefficient of 6–78.5, in technosoils - from 0.3 to 3.1 with a concentration coefficient of 2–90. Se recovery depends on the type of deposits being developed. The content of Se in the terrestrial parts of plants varies (ppm) from 0.004 to 0.21. The maximum content of it in plants of soils (0.02 ppm) and ore dressing tailings (0.07–0.21 ppm) of tin-polymetallic deposits, 0.01–0.03 for molybdenum and 0.02–0.04 ppm of gold ore. A tendency to increase the coefficient of biological absorption in plants growing on ore dressing tailings, compared with those on soils and background areas (from 0.02 to 0.42). It is established that there is no dependence between it and the Se content in soils and ore dressing tailings, which is due to the different ratios of mobile and stationary forms of its presence in soils and ore dressing tailings.

Keywords: *selenium, geosystem, soil, plants, selenium deficiency, ore dressing tailings, vegetables*

Source of financing: Subject No. 0309-2021-0005 of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

For citation: Yurgenson G.A., Solodukhina M.A., Filenko R.A., Mikhailova L.A. (2022) Selenium in natural-anthropogenic geosystems of mining areas of Transbaikalia. *Geosfernye issledovaniya – Geosphere Research*. 3. 93–108. (In Russian). doi: 10.17223/25421379/24/6

Введение

Селен относится к малораспространенным химическим элементам, среднее содержание которого в Земной коре составляет всего 0,05 г/т (ppm). Он входит в VI группу Периодической системы и является наряду с теллуром и полонием ближайшим аналогом серы. Поэтому он легко входит в состав сульфидов, замещая ее. В отличие от серы, он менее подвижен. В природных условиях в зоне окисления сульфидных месторождений селен может относительно легко выноситься на ландшафт и в подземные воды в форме $(\text{SeO}_4)^{2-}$. Соли селеновой кислоты растворимы в воде и могут участвовать в водной миграции. В зонах окисления сульфидных месторождений развиты селенаты или селениты [Гавриленко, 1993]. Однако селенистокислые соли, возникающие на геохимических барьерах, практически нерастворимы в воде и легко переходят в осадок, образуя соединения типа $\text{MeSeO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$. Исключение составляют селениты K и Na, которые участвуют в водной миграции в растворённом виде. Кислые селенистокислые соли, или биселениты, легко мигрируют подобно бикарбонатам.

Забайкалье относится к одной из исторических горнопромышленных территорий, где широко развиты полиметаллические, золото-полиметаллические, олово-полиметаллические, золоторудные, молибденовые и сульфидно-вольфрамитовые месторождения, разработка которых ведется на протяжении XVIII–XXI вв. В результате этого сформировались природно-антропогенные геосистемы горнопромышленных территорий, где одной из важных составляющих руд являются сульфиды, с которыми преимущественно связан селен. Поэтому изучение распространенности этого элемента в основных компонентах ландшафта данных территорий с учетом свойств селена представляется весьма актуальной задачей.

Поведение селена в этих условиях специфично. На восстановительных геохимических барьерах, вероятно, может иметь место селенат-редукция с образованием селенидов. Поэтому относительно высокая селенистость руд и продуктов их окисления не всегда обеспечивает нахождение селена в ландшафте, в частности в почвах, в формах, пригодных для усвоения растительностью, являющейся источником селена для биоты, в том числе для домашних животных, дающих с пищей необходимый человеку селен.

В условиях природно-антропогенных геосистем, где происходит переработка руд, возникает резкая активизация реакционной способности селена вследствие нарушения сплошности содержащих селен природных минеральных агрегатов в рудах, воздействия реагентов, участвующих в обогащении руд, влияния процесса механохимических преобразований при измельчении и перемещении в пульпе, аккумуляруемой в хвостохранилищах в виде хвостов обогащения. Здесь следует считать очевидным высвобождение части селена и переход его в подвижное состояние. В этих условиях вследствие интенсивного окисления сульфидов вода в хвостохранилище может быть слабощелочной (pH 8) или кислой, сульфатной, а в условиях соприкосновения с атмосферой – окислительной и поэтому способной переводить селен в подвижное состояние.

В рыхлых, щелочных, хорошо аэрируемых почвах селен присутствует в значительной мере в форме селенатов, которые хорошо растворимы и легко усваиваются растениями. Но в кислых, заболоченных почвах верхних частей хвостохранилищ селен может находиться и в виде малорастворимых комплексов с железом, обладающих очень низкой биодоступностью [Горбунов и др., 2011]. Низкая температура воздуха, значительная заболоченность местности при относительно невысоких pH грунтов способствуют удерживанию почвами восстановленных

форм селена, которые мало доступны для растений [Голубкина, Соколов, 1997].

Особенностью селена является как высокая токсичность (ПДК около 0,0001 мг/л) [Кудрявцев, 1961], так и весьма высокие биофильность и биодоступность, заключающиеся в проникновении этого элемента в эритроциты, клетки мышц, печени, селезенки и щитовидной железы. Селен поступает в организм человека с продуктами растениеводства и животноводства, что определяет зависимость уровня обеспеченности микроэлементом от геохимических условий проживания [Аникина, 1996]. Исходя из этого актуальность изучения поведения селена в ландшафте заключается еще и в необходимости познания его содержаний и форм нахождения в связи с его положительными и негативными свойствами для биоты.

Селен является антиоксидантом непрямого действия, так как его соединения, поступающие с пищевыми продуктами, сами по себе антиоксидантами не являются. Активными антиоксидантами являются селенопротеины, которые синтезируются при помощи поступающих с пищей соединений этого элемента непосредственно в организме [Горбунов и др., 2011].

В 1986–1987 гг. в Читинской области установлено наличие болезни Кешана – эндемической селенодефицитной кардиопатии [Седов, Иванов, Вощенко, 1988; Никитина, Иванов, 1995].

Определено, что в почвах наиболее неблагоприятного Улётовского района содержание подвижных форм селена колебалось от 11 до 74 мкг/кг, что позволило отнести данную местность к эндемичной [Аникина, 1996; Седов, Иванов, Вощенко, 1988]. Исследованиями установлено, что содержание селена в мясе сельскохозяйственных животных составило $28,4 \pm 4,62$ мкг/кг для говядины, $29,4 \pm 3,9$ мкг/кг для баранины, в пшенице – $2,8 \pm 0,54$ мкг/кг, коровьем молоке – $1,7 \pm 0,15$ мкг/кг, свекле – $34,9 \pm 2,7$, картофеле – $8,7 \pm 0,71$ мкг/кг, что указывает на недостаточную обеспеченность биотиком местных жителей. При изучении содержания селена в сыворотке крови здоровых людей обнаружены его значения на уровне $48,5 \pm 1,5$ мкг/л при норме 120 мкг/л, что свидетельствует о низкой концентрации элемента, отражающей состояние селенодефицита у населения [Никитина, Иванов, 1995; Вощенко и др., 1996; Белозерцев, Иванов, 1997; Дремина, Прокофьева, 1997]. Выявлено, что уровень микроэлемента при болезни Кешана снижается до 32,4 мкг/л, миокардиодистрофии до 35,0 мкг/л, у больных эндемическим зобом показатель составил 64 мкг/л, беременных женщин – 60 мкг/л. При дефиците селена снижается активность глутатионпероксидазы, что провоцирует генерацию продуктов свободнорадикального окисления, накоп-

ление в крови восстановленного глутатиона [Дремина, Прокофьева, 1997; Осипова и др., 1990].

Исходя из сказанного целью настоящего исследования является определение содержаний селена в компонентах природно-антропогенных горнопромышленных и сельскохозяйственных геосистем Забайкальского края.

Материал и методы исследования

Из наиболее важных компонентов природно-антропогенных геосистем изучены руды, почвы, отходы горного производства и растения территорий, где разрабатывались Шерловогорское и Хапчерангинское олово-полиметаллические, Любавинское и Ключевское золоторудные, Давендинское, Бугдаинское и Жирекенское молибденовые, Бом-Горхонское, Антоновогорское, Букуинское вольфрамные и другие месторождения (рис. 1).

Отбор проб почвообразующих горных пород, руд, почв и растений был проведен в течение полевых сезонов 2001–2018 гг. Пробы почв отобраны в соответствии с ГОСТ 17.4.4. 02-84 по искусственным обнажениям. На каждом участке наблюдения проводили по точкам, хорошо изученным в геологическом отношении, где отбирали объединенные пробы доминантных видов растений из каждого яруса, которые встречаются на всех участках. Растения делили на органы. Корни и наиболее запыленные части растений промывали сначала струей проточной воды, а затем дистиллированной, и высушивали до воздушно-сухого состояния. Каждая проба растений формировалась из 15 экземпляров с площади 10×10 м. В данной работе использованы результаты анализа 215 проб (3 225 экземпляров) травянистых растений (типичная сухостепная и горно-таежная растительность) Шерловогорского, Хапчерангинского, Балейского, Карамкенского, Давендинского, Ключевского, Жирекенского горнопромышленных районов. Общее число исследованных проб овощей (картофель, свекла, морковь) – 40.

Изучение горных пород, руд, почв и хвостов обогащения проводилось стандартными методами. Исследование минерального состава выполнено в иммерсионных препаратах, шлифах и аншлифах на поляризационном микроскопе Axio Scope.A1. Для выявления собственных минералов селена просмотрено 58 аншлифов, из них с использованием электронного микроскопа с целью изучения химического состава сульфидов на содержание селена – 46. Минеральный состав исследован также и электронно-зондовым методом на растровом электронном микроскопе LEO 1430 VP (аналитики Е.А. Хромова, Е.В. Ходырева, ГИН СО РАН, г. Улан-Удэ, руководитель лаборато-

рии канд. техн. наук С.В. Канакин). Общее число проб руд, почв и хвостов обогащения, проанализированных на содержание селена, составило 90.

Диагностика глинистых минералов проводилась методами рентгеноструктурного анализа в Центре коллективного пользования «Геодинамика и геохронология» Института земной коры СО РАН (аналити-

ки З.Ф. Ушаповская, Т.С. Филева). С целью проведения дифрактометрических исследований глинистой составляющей выделялась тонкая фракция, для чего образцы были истерты резиновым пестиком в дистиллированной воде. Полученная суспензия нанесена на предметные стекла и высушена при комнатной температуре.

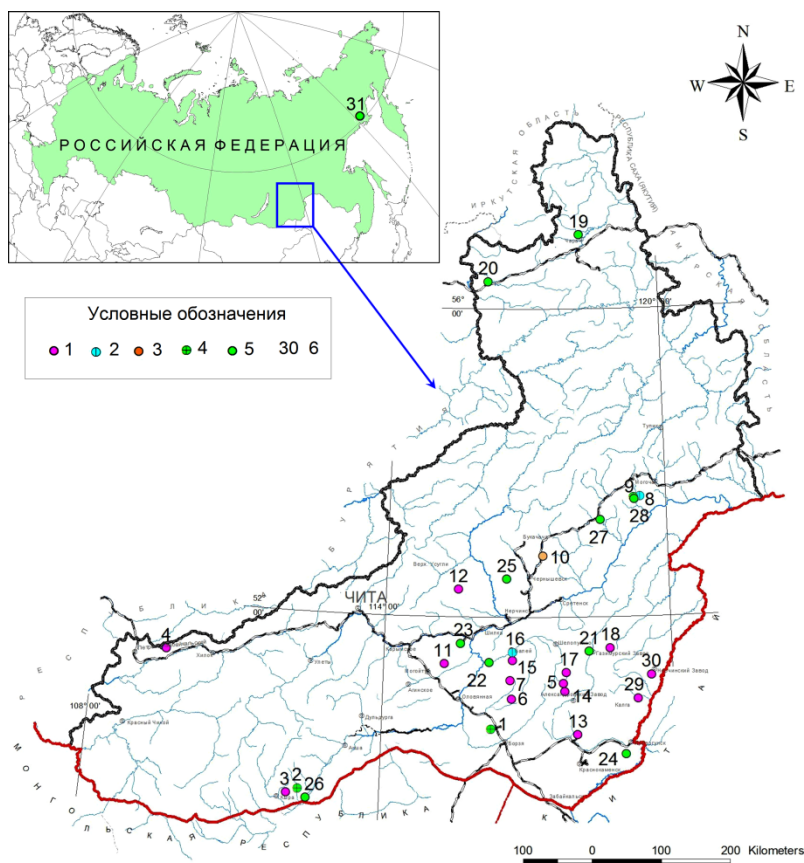


Рис. 1. Карта расположения объектов исследования

1 – руды и минералы; 2 – руды, минералы и растения; 3 – руды, минералы, хвостохранилища и растения; 4 – руды, минералы, хвостохранилища, почвы и растения; 5 – растения и сельхозпродукция; 6 – номер места отбора проб. На карте обозначены месторождения и населенные пункты: 1 – Шерловая Гора, 2 – Хапчеранга, 3 – Любовь, 4 – Бом-Горхон, 5 – Бугдая, 6 – Антонова Гора, 7 – Букука, 8 – Ключевский, 9 – Александровское, 10 – Жирекен, 11 – Барун-Шивея, 12 – Вершино-Дарасунский, 13 – Савинское № 5 и Кличкинское, 14 – Акатуй, 15 – Среднеголготайское, 16 – Балей, 17 – Шахтаминское, 18 – Новоширокское, 19 – Чара, 20 – Куанда, 21 – Газимурский Завод, 22 – Ундино-Поселье, 23 – Первомайский, 24 – Молодежный, 25 – Старый Олов, 26 – Верхний Ульхун, 27 – р. Черная, ст. Сбега, 28 – Давенда, 29 – Кадаинское, 30 – Центральное и Воздвиженское, 31 – Карамкенское

Fig. 1. Map of the location of research objects

1 – ores and minerals; 2 – ores, minerals and plants; 3 – ores, minerals, tailing dumps and plants; 4 – ores, minerals, tailing dumps, soils and plants; 5 – plants and agricultural products; 6 – number of the sampling site. The map shows deposits and settlements: 1 – Sherlovaya Gora, 2 – Khapcheranga, 3 – Lyubov, 4 – Bom-Gorkhon, 5 – Bugdaya, 6 – Antonova Gora, 7 – Bukuka, 8 – Klyuchevsky, 9 – Aleksandrovskoe, 10 – Zhireken, 11 – Barun-Shiveya, 12 – Vershino-Darasunsky, 13 – Savinskoe No. 5 and Klichkinskoe, 14 – Akatuy, 15 – Srednegolgotayskoe, 16 – Baley, 17 – Shakhtaminskoe, 18 – Novoshirokinskoe, 19 – Chara, 20 – Kuanda, 21 – Gazimursky Zavod, 22 – Undino-Poselie, 23 – Pervomaisky, 24 – Molodezhny, 25 – Sary Olov, 26 – Verkhniy Ulkhun, 27 – Chernaya River, Sbegas station, 28 – Davenda, 29 – Kadainskoe, 30 – Sentral'noe and Vozdvizhenskoe, 31 – Karamkenskoe

Проводилось по три съемки для каждого образца: воздушно-сухого, насыщенного этиленгликолем и прокаленного до 550 °С. Образцы, истерты в яшмо-

вой ступке со спиртом до состояния пудры, исследованы методом порошковой дифракции на дифрактометре ДРОН-3.0, излучение – CuK α , Ni-фильтр,

$V = 25$ кВ, $I = 20$ мА, диапазон $3\text{--}60^\circ(2\theta)$, шаг сканирования – $0,05^\circ$. Полученные данные использованы для идентификации фазового состава образцов с применением программы поиска фаз с помощью минералогической базы данных PDF-2 (2007 г.). Для достоверности результатов рентгенофазового анализа дополнительно проведено рентген-флуоресцентное определение содержаний основных и примесных элементов на кристалл-дифракционном спектрометре S8 Tiger (Bruker Nano GmbH, Германия).

Термогравиметрический анализ использовался для диагностики глинистых минералов и осуществлялся в Институте природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН (ИПРЭК СО РАН), в лаборатории геохимии и рудогенеза на приборе Netzsch STA 449F1. Условия выполнения: скорость 10°C в мин, нагревание до $1\,000\text{--}1\,200^\circ\text{C}$ в потоке аргона или воздуха. Масса образца составляла $10\text{--}20$ мг, использовался платиновый или корундовый тигель.

Для изучения возможности выноса селена из рыхлых отложений водой выполнена серия опытов отмывания глин из продуктов поздних низкотемпературных отложений гидротермальных растворов в продуктивных на камнесамоцветное сырье берилл-топаз-кварцевых жил, содержащих висмутин, галенит, арсенопирит, молибденит и другие минералы, в составе которых присутствует селен. Содержание селена определено в глинистой фракции, представленной иллитом, смектитом и каолинитом, а также промывных водах с pH $6,9\text{--}7,2$.

Химические анализы руд, горных пород и глин выполнены методом ICP-MS в лаборатории ОАО «Восток лимитед» (руководители Т.Л. Попова, А. Шацких). Содержание селена в горных породах, рудах, глинах, почвах и отходах горного производства определено методом ICM40B, НПО $0,2$ г/т, в растворах и воде методом IMS84T, НПО – 1 мг/т. Химический анализ растений произведен ме-

тодом ICP-MS на спектрофотометре ICP-MS Elan 9000 PerkinElmer (США) методом кислотного разложения ПНД Ф 16.1:2.3:3.11-98, стандартный образец: Тр-1 (ГСО № 8922-2007), в Хабаровском инновационно-аналитическом центре Института тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН (аналитики А.В. Штарева, В.Е. Зазулина, Л.С. Боконенко, А.Ю. Лушников, Д.В. Авдеев, Е.М. Голубева). Нижний порог определения (НПО) для селена $\sim 0,001$ мкг/кг.

Результаты и их обсуждение

Анализ распространенности сульфидов, являющихся основными носителями селена и источниками поступления его в почвы, показал, что он распространен во многих промышленных и формационных типах рудных месторождений Забайкалья [Юргенсон, 1994, 1997, 2008]. Результаты этого анализа, дополненные после изучения руд и слагающих их минералов, представлены в табл. 1.

Главными носителями селена в рудах полиметаллических и других месторождений являются галенит, сфалерит, молибденит и халькопирит (табл. 1), ибо, несмотря на относительно низкие содержания в них селена, распространенность их значительно выше собственных его минералов.

С целью изучения распределения селена в рудах подготовлены и проанализированы их усредненные пробы. Содержание селена в них представлено в табл. 2.

Как видно из табл. 2, среднее содержание селена в анализированных пробах руд находится в пределах $0,5\text{--}8$ г/т, максимальных концентраций достигая в Жирекенском месторождении. Коэффициенты концентрации селена относительно кларка достаточно высоки и варьируют от 10 для месторождений вольфрама до 160 в руде Жирекенского месторождения молибдена.

Таблица 1

Содержание селена в минералах рудных месторождений Забайкалья

Table 1

Selenium content in minerals of ore deposits in Transbaikalia

Минерал	Se, мас. %	Месторождение	Источник
Галенит	$0,001\text{--}1,25$	Дарасунское, Воздвиженское, Центральное, Савинское № 5, Кадаинское, Центральное, Новоширокинское, Шерловогорское, Халчерангинское и др.	[Тимофеевский, 1972; Юргенсон, 2008], новые наши данные
Галенобисмутит	$0,001\text{--}13,8$	Дарасунское, Шерловогорское, Халчерангинское, Среднегологотайское	[Тимофеевский, 1972; Юргенсон, 2008]
Висмутин	$0,000\text{--}0,62$	Среднегологотайское, Дарасунское, Давендинское, Шерловогорское, Халчерангинское, Букукинское и др.	[Тимофеевский, 1972; Бортников и др., 1982; Юргенсон, 2008]
Теллуrowисмутит	$0,000\text{--}0,2$	Среднегологотайское, Дарасунское, Давендинское, Букукинское и др.	То же
Лиллианит	$0,000\text{--}2,97$	Букукинское, Шерловогорское	Наши новые данные
Тетраэдрит, теннантит, фрейбергит,	$0,000\text{--}0,16$	Шерловогорское, Бaleyское, Дарасунское, полиметаллические месторождения Забайкалья	[Бaleyское рудное поле, 1984; Тимофеевский, 1972; Юргенсон, 2008], наши новые данные

Минерал	Se, мас. %	Месторождение	Источник
Кобеллит	0,01–0,87	Среднеголготайское	[Бортников и др., 1982]
Тетрадимит	0,001–4,9	Шерловогорское, Хапчерангинское, Балейское, Дарасунское, Новоширокинское, полиметаллические месторождения Забайкалья	[Балейское рудное поле, 1984; Тимофеевский, 1972; Бортников и др., 1982; Юргенсон, 2008], наши новые данные
Жозеит	0,9–2,42	Среднеголготайское	[Бортников и др., 1982]
Икунолит	2,68–7,84	Среднеголготайское, Антонова Гора	[Бортников и др., 1982], наши новые данные
Алтаит	0,08	Балейское, Дарасунское, полиметаллические месторождения Приаргуны	То же
Молибденит	0,001–0,1	Шерловогорское, Жирекенское, Бугдаинское, Шахтаминское, Ключевское, Среднеголготайское	[Сотников и др., 1995a, 1995b; Юргенсон, 2008], наши новые данные
Пирит	0,001–0,008	Шерловогорское, Жирекенское, Бугдаинское, Шахтаминское, Ключевское, Среднеголготайское, Хапчерангинское	То же
Халькопирит	0,0005–0,001	Шерловогорское, Бугдаинское, Среднеголготайское	[Юргенсон, 2008]
Сфалерит	0,0012–0,004	Савинское № 5, Кличкинское, Северо-Акатуевское	[Юргенсон, 2008], наши новые данные

Таблица 2

Содержание селена в рудах месторождений Забайкалья

Table 2

Selenium content in ores of Transbaikalia deposits

Месторождение	№ пробы	Se, г/т	Минеральная ассоциация	Коэффициент концентрации относительно кларка
Антонова Гора	AG3	1,3	Галенит-висмутин-вольфрамит-кварцевая	26
	AG4	0,5	Сфалерит-висмутин-вольфрамит-кварцевая	10
	AG-1	0,7	Сфалерит-галенит-висмутин-вольфрамит-кварцевая	14
	AG-2	1,6	Галенит-висмутин-вольфрамит-кварцевая	32
Букукинское	БК-1	3,4	Тетрадимит-галенит-висмутин-вольфрамит-кварцевая	68
	БК-2	3,6	То же	72
	БК3	1,8	Галенит-висмутин-вольфрамит-кварцевая	36
	БК4	1,8	Галенит-висмутин-вольфрамит-кварцевая	36
Барун-Шивеевское	BSH-18/04	0,5	Пирит-антимонит-ферберит-кварцевая	10
	BSH-18/117/1	1,0	То же	20
Шерловогорское	ШГ-10	1,9	Арсенопирит-галенит-висмутин-ферберит-кварцевая	38
Жирекенское	Zh-2-8	8	Молибденит-халькопирит-полевошпатово-кварцевая	160

Примечание. Величина кларка 0,05 г/т взята по [Виноградов, 1962] для гранитов.

Note. The clark value of 0.05 ppm is taken after [Vinogradov, 1962] for granites.

Таблица 3

Средние содержания селена в почвах рудных полей

Table 3

Average selenium content in soils of ore fields

Горное предприятие	Статистические характеристики содержания, г/т					Среднее значение коэффициента концентрации
	n	x	σ	Min	Max	
Шерловогорский ГОК Александровский рудник Хапчерангинский рудник	33	3,03	1,11	0,7	4,9	40,5
	5	0,3	–	0,2	0,4	6
	6	3,46	1,45	2,7	5,5	78,5

Примечание. n – число проб; x – среднее содержание; σ – среднеквадратичное отклонение; Min – минимальное значение; Max – максимальное значение.

Note. n is the number of samples; x – average content; σ is the standard deviation; Min – minimum value; Max – maximum value.

В табл. 1–3 среднее содержание селена в почвах и хвостах обогащения руд принято как среднее значение кларков между крайними содержаниями для почв и кислых горных пород 2–10 и 0,6 г/т [Виноградов, 1962].

Почвы Шерловогорского рудного поля (см. табл. 3) существенно обогащены селеном (среднее содержание селена 3,03 г/т, вариация 0,7–4,9 г/т). Это фиксируется и высоким средним значением коэффициента его концентрации (40,5). Ниже будет показано, что одним из важных источников селена в почвах является рыхлый материал жил, размывающийся атмосферными водами.

Содержание селена в почвах локализации поселения Хапчеранга (среднее 3,46 г/т, вариация 2,7–5,5 г/т) также высокое. Фоновое содержание в почве в лесу в 1,5 км от поселения 1,1 г/т. Коэффициент концентрации селена в почве находится в пределах 50–110, в среднем составляя 78,5, что превышает значения для Шерловогорского рудного района. Это обусловлено тем, что по сравнению с Шерловогорским месторождением в рудах Хапчеранги содержалось существенно больше галенита и галенобисмутита, с которыми обычно связан селен (см. табл. 1). Коэффициент концентрации для фона в лесной почве составляет 22. Это свидетельствует о том, что территория локализации поселка Хапчеранга находится в пределах комплексной геохимической аномалии, включающей не только олово, мышьяк, вольфрам, свинец, цинк и кадмий, но и необходимый живым организмам селен.

Наименьшее содержание селена из исследованных объектов выявлено для почв вскрыши карьером Александровского рудника, разрабатывающего соответствующее золоторудное месторождение, являющееся флангом Давендинского золото-молибденового рудного поля. Содержание селена по двум пробам почв составляет 0,3 г/т при вариации 0,2–0,4 г/т и коэффициенте концентрации 6. Низкие содержания селена здесь обусловлены двумя наиболее важными факторами. Во-первых, эта территория находится в горно-таежной ландшафтно-географической зоне с широко развитой многолетней мерзлотой, сдерживающей миграцию селена

[Юргенсон, 1997], и, во-вторых, здесь содержание галенита и галенобисмутита, основных источников этого элемента в почвах, существенно ниже, чем в рудах Шерловогорского и Хапчерангинского месторождений. Источником селена в почвах Александровского рудника являются пирит, халькопирит и молибденит.

Распределение селена в хвостах обогащения руд представлено в табл. 4. Анализ данных табл. 4, где представлены результаты обработки содержаний селена в хвостохранилищах, показал, что максимальные содержания в них присущи хвостохранилищам обогащательных фабрик, перерабатывавших олово-полиметаллические руды Шерловогорского и Хапчерангинского месторождений. Существенно меньшие содержания селена зафиксированы в хвостохранилище Александровского рудника (0,5 г/т), разрабатывающего золото-молибденит-пирит-кварцевые руды и Жирекенского ГОКа (0,3 г/т), производившего молибденитовый и халькопиритовый концентраты.

Эти четкие различия видны на рис. 2, где показано сравнение содержаний селена в почвах и в лежащих хвостах обогащения руд изученных месторождений и Александровского рудника.

Содержания селена в почвах Хапчерангинской селитебной территории существенно выше, чем в материале хвостохранилища. Эти различия заключаются в том, что территория находится в пределах крупной природной геохимической аномалии с высокими содержаниями рудных элементов. Меньшие содержания (1,3–3,5 г/т), но, тем не менее, сверхкларковые (коэффициенты концентраций 26–70), свидетельствуют о несовершенстве технологии извлечения сульфидов, на что указывалось нами ранее [Юргенсон, 2020], являющихся, как это видно из табл. 3 и 4, носителями селена в сфалерит-халькопирит-арсенопиритовой ассоциации с висмутином и галеновисмутитом [Онтеев, 1974]. Несущественное различие в содержаниях селена в почвах и хвостах обогащения руд Шерловогорского рудного района обусловлено тем, что здесь извлекался, в основном, касситерит, носители селена сульфиды оставались в хвостах обогащения руд.

Таблица 4

Статистические характеристики содержаний и коэффициентов концентраций селена в хвостохранилищах Забайкалья

Table 4

Statistical characteristics of the contents and concentration coefficients of selenium in of the tailing dumps of Transbaikalia

Предприятие	Число проб	Параметры содержаний			Параметры коэффициентов концентрации		
		х	σ	Размах	х	σ	Размах
Жирекенский ГОК	11	0,3	0,23	0,1–0,8	6,2	4,55	2–16
Александровский рудник	11	0,5	0,18	0,2–0,7	8,4	3,17	4–10
Шерловогорский ГОК	12	3,1	0,88	1,9–4,5	62,3	17,7	38–90
Хапчерангинский рудник	14	1,9	0,56	1,3–3,5	38,3	11,50	26–70

Примечание. n – число проб; х – среднее содержание; σ – среднеквадратичное отклонение.

Note. n is the number of samples; x – average content; σ is the standard deviation.

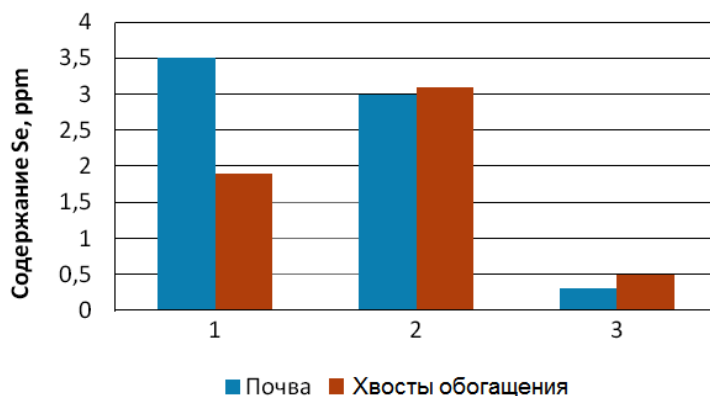


Рис. 2. Содержание селена в почвах и хвостах обогащения руд Хапчерангинского (1) и Александровского (3) рудников и Шерловогорского ГОКа (2)

Fig. 2. Selenium content in soils and tailing dumps of Khapcheranginsky (1) and Aleksandrovsky (3) mines and Sherlovogorsky GOK (2)

Большее содержание селена в хвостохранилище Александровского рудника также обусловлено извлечением золота гравитационным методом, когда носители селена пирит, халькопирит и молибденит остаются в хвостах обогащения.

Установлено, что извлечение селена из руд в процессе их обогащения различается в зависимости от минеральных типов промышленных руд (табл. 5). Это хорошо видно на примере месторождения Сопка Большая, из руд которого извлекался только касситерит: содержание селена в хвостах обогащения оказалось большим, чем в исходной руде.

Одним из источников селена в почвах Шерловогорского рудного района являются рыхлые отложения, содержащиеся в полостях продуктивных на камнесамоцветное сырье висмутин-галенит-сфалерит-арсенопирит-берилл-топаз-кварцевых жильных тел. В них находятся также глинистые минералы, сорбирующие многие элементы-спутники рудного процесса, к которым относится и селен. В результате длительной (с 1787 г. по настоящее время) активной разработки месторождения существенная часть этих жильных образований вскрыта горными выработками и содержащий глины рыхлый материал выведен на дневную поверхность, где он подвергается воздействию атмосферных вод и размывается. По данным дифрактометрического и термогравиметрического анализов, глины содержат иллит, смектиты, включая монтмориллонит и другие смешанно-слоистые силикаты, хлорит и каолинит. Из них вымываются многие химические элементы, в том числе и селен. Это видно из данных табл. 6. Содержание селена в глинистом материале достаточно велико и достигает 26 г/т, в среднем составляя

7,2 г/т. Коэффициент концентрации селена относительно кларка для глин (0,6 г/т) в среднем (7,2 : 0,6) составляет 12.

Такое высокое содержание Se в глинистой фракции рыхлых отложений обусловлено высоким содержанием в ней тонкодисперсных гидроокислов железа, являющихся сорбентами соединений селена. Извлечение Se из глин промывной водой с pH 6,8–7,2 велико и варьирует от 1 до 21 мг/т, при среднем его содержании в воде 5,4 мг/т. Доля отмытого водой Se варьирует от 0,0125 до 1,05 %, в среднем составляя 0,192 % при среднеквадратичном отклонении 0,26 и ($\sigma/x = 1,35$). На рис. 3 показана прямая корреляция между содержаниями селена в глине и промывной воде. Исключение составляют лишь пробы 7 (HG-15/18) и 8 (HG-13/186), в которых тонкодисперсный селен в глине представлен вкрапленностью галенобисмутита и висмутина, содержащих селен. Селен в пределах 0,3–15 г/т содержится также и в новообразованных сульфатах, образующихся из растворов, мигрирующих в рыхлых отложениях в карьере отработки олово-полиметаллических руд.

Впервые в вольфрамовой руде Антоновой Горы электронно-микроскопическими исследованиями выявлен минерал селена икунолит (табл. 7) открытый в Японии [Kato, 1959] и описанный в других месторождениях [Criddle and Stanley, 1993]. Икунолит известен также на месторождении Кара-Оба [Минцер, Нечелюстов, 1975], на Кокчарском месторождении (Южный Урал) [Спиридонов, 1996], Высокогорском месторождении (Приморье) [Финашин и др., 1979] и в рудах Среднеолготайского месторождения в Забайкалье [Бортников и др., 1982]. На Антоновой Горе икунолит приурочен к ассоциации,

включающей относительно крупный кристалл пирита, по периферии содержащий, вероятно, те же минералы висмута и селена (рис. 4).

Пирит окружен корочкой халькопирита на переходе к сидериту. По краям кристалл пирита также содержит включения минералов селена и висмута. Химический состав икунолита представлен в табл. 7.

Низкая сумма обусловлена малыми размерами (первые микроны) выделений минерала. Тем не менее расчет формульных коэффициентов, исходя из атомных количеств и суммы формульных коэффициентов 7 для икунолита [Флейшер, 1990], позволил получить кристаллохимические формулы, подтверждающие правильность предположения:

обр. АГ-133- 3-1-1 $\text{Bi}_{3,951}(\text{S}_{2,097}\text{Se}_{0,951})_{\Sigma 3,048}$

обр. АГ-133- 3-1-7 $\text{Bi}_{4,001}(\text{S}_{1,948}\text{Se}_{1,042})_{\Sigma 2,99}$

Полученные формулы соответствуют современным представлениям об икунолите [Malcolm, 2014] $\text{Bi}_4(\text{S}, \text{Se})_3$. В рудах Балейского рудного поля относительно высокие содержания селена (1,5–19,1 %) обнаружены в миаргирите [Балейское рудное..., 1984].

Таким образом, установлены сверхкларковые содержания селена в почвах Шерловогорского, Хапчегинского, Александровского рудных полей и в хвостохранилищах обогатительных фабрик этих горных предприятий, а также и Жирекенского ГОКа (см. табл. 1). Кроме того, селен присутствует в рудах всех месторождений Забайкалья, содержащих сульфиды. Отсюда вытекает необходимость рассмотрения содержания селена в развитых здесь почвах, растительных сообществах и овощах, выращиваемых на селитебных территориях, прилегающих к горнопромышленным комплексам.

Таблица 5

Зависимость содержания селена в хвостах обогащения от промышленного типа руд

Table 5

Dependence of the selenium content in the tailings on the industrial type of ores

Типы руд	Показатели			Источник
	Содержание в руде, %	Извлечение в товарный продукт, %	Доля в хвостах от содержания в руде, %	
Стратиформные	0,0002	21,2	93,2	[Кудрявцев, 1961]
Жильные	0,00052	67	33	То же
Скарновые	0,00045	20	86	То же
Колчеданно-полиметаллические	0,00163	22,2	14,8	То же
Медно-молибденовые	0,0008	—	3,8	Наши данные
Штокверковые сульфидно-касситеритовые	0,00019	—	163	То же

Таблица 6

Селен в глинах Шерловой Горы и промывных водах

Table 6

Selenium in clays of Sherlova Gora and washing waters

№ п/п	№ пробы	Содержание Se в глине, г/т	Содержание в воде, мг/т	Извлечение, %
1	HG-09/300	2	9	0,45
2	HG-12/209	2	8	0,40
3	HG-15/12	24	6	0,025
4	HG-15/14	25	5	0,02
5	HG-15/15	26	7	0,027
6	HG-15/17	2	5	0,25
7	HG-15/18	2	7	0,35
8	HG-13/186	2	21	1,05
9	HG-12/219	4	14	0,35
10	SHG-12/218-1	3	1	0,033
11	SHG-13/199-1	2	1	0,05
12	SHG-16/25	3	1	0,033
13	SHG-16/26	5	1	0,02
14	SHG-16/27	3	1	0,033
15	SHG-16/206	8	1	0,0125
16	SHG-16/207	7	1	0,014
17	SHG-16/218-1	2	3	0,15
n		17	17	17
x		7,2	5,4	0,192
σ		8,4	5,3	0,26

Примечание. n – число проб; x – среднее содержание; σ – среднеквадратичное отклонение.

Note. n is the number of samples; x – average content; σ is the standard deviation.

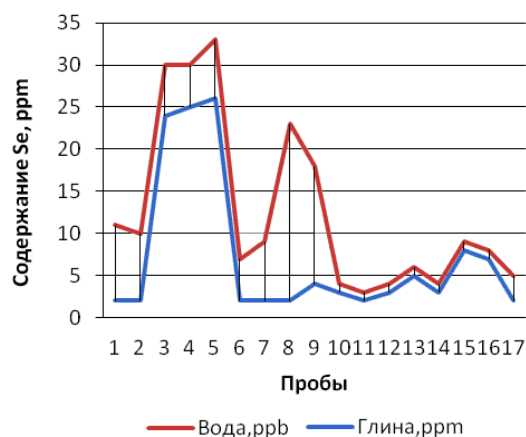


Рис. 3. Корреляция между содержаниями селена в глине и промывной воде

Содержания селена представлены в удобном для изображения масштабе и номера проб на горизонтальной оси рисунка соответствуют порядковым номерам в табл. 6

Fig. 3. Correlation between the contents of selenium in clay and wash water

The selenium contents are presented in a scale convenient for the image, and the sample numbers on the horizontal axis of the figure correspond to the serial numbers in the table 6

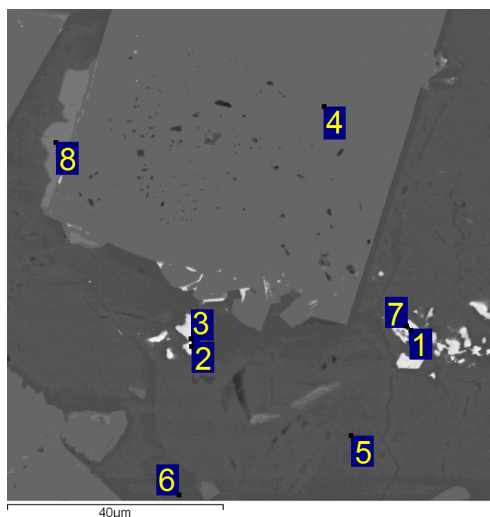


Рис. 4. Икунолит (1, 7) в ассоциации с самородным висмутом с примесью серы (2), висмутином (3), халькопиритом (8), сидеритом (5, 6) и относительно крупным кристаллом пирита (4).

Обр. АГ-133, Антонова Гора. Электронно-микроскопический снимок

Fig. 4. Ikunolite (1, 7) in association with native bismuth with an admixture of sulfur (2), bismuthine (3), chalcopyrite (8), siderite (5, 6) and a relatively large pyrite crystal (4). Sample AG-133, Antonova Gora. Electron microscopic image

Таблица 7

Химический состав икунолита (?) месторождения Антонова Гора

Table 7

Chemical composition of ikunolite (?) from the Antonova Gora deposit

Номер образца и его части	Элемент и его содержание, %			Сумма
	S	Se	Bi	
Весовые проценты				
АГ-133-3-1-1	6,06	6,77	74,43	87,27
3-1-7	5,95	7,84	79,83	93,63
Весовые проценты нормированные к 100 %				
АГ-133-3-1-1	6,94	7,76	56,45	100
3-1-7	6,36	14,89	57,28	100

Селен в растениях. Определено содержание Se в наземной части травянистых растений, грибах и лишайниках. В травянистых растениях фоновых территорий за пределами геохимических аномалий, содержание Se не превышает значений 0,001 г/т, возрастая от нижнего предельного в безрудных территориях до 0,21 г/т в растениях на территории техногенных массивов Шерловгорской геохимической аномалии.

В районах нахождения техногенных массивов (золотоизвлекательные фабрики, хвостохранилища, отвалы горных пород) содержание Se в растениях на порядок выше (табл. 8). В грибах маслятах его содержание возрастает до 0,1 г/т, а в лишайниках соответствует содержанию в травянистых растениях (0,01 г/т).

Важной особенностью является повышенное его содержание в растениях, произрастающих на техногенных массивах в районах геохимических аномалий. Здесь, по-видимому, субстрат обогащен Se за счет его вовлечения в биологический круговорот в результате интенсивного окисления и разложения рудообразующих селенсодержащих сульфидов под действием геотехногенеза.

Установлена тенденция к возрастанию коэффициента биологического поглощения (КБП) в растениях, произрастающих на хвостохранилищах по

сравнению с таковыми на почвах и фоновых участках (табл. 9).

Сравнение величин КБП и содержаний селена в почвах и хвостах обогащения руд показывает отсутствие зависимости между ними: при близких содержаниях его в почвах и хвостах обогащения Шерловгорского и Хапчерангинского района (3,03–3,5 г/т) величины КБП различаются на порядок (0,02–0,42). В случае различий в содержаниях селена от 0,3 до 1,9 г/т, КБП находится в весьма узких пределах 0,033–0,04. Это подтверждает ранее сделанные нами выводы для других химических элементов [Юргенсон и др., 2016; Солодухина, Юргенсон, 2018]. Эта закономерность обусловлена различными соотношениями подвижных и неподвижных форм нахождения селена в почвах и хвостах обогащения руд.

Селен в овощах. Изучено содержание Se в овощах (картофель, морковь, свекла), отобранных в пределах территорий влияния бывших горнопромышленных объектов в Борзинском, Бaleyском, Кыринском, Газимуро-Заводском, Каларском, Приаргунском, Шилкинском и Чернышевском районах.

Максимальное содержание селена установлено в пробах съедобной части картофеля, моркови и свеклы, отобранных в Кыринском (с. Хапчеранга и Верхний Ульхун) и в Бaleyском районах (с. Ундино-Поселье) (табл. 10).

Таблица 8

Селен в наземной части травянистых растений, грибах и лишайниках, г/т

Table 8

Selenium in the aerial part of herbaceous plants, fungi and lichens, ppm

Место отбора проб	Вид ландшафта и геохимическая характеристика	Тип биологического объекта	Содержание	Число проб и число исследованных экземпляров
Забайкальский край, Борзинский район пос. Вершинка (Шерловая Гора)	Природно-техногенный, месторождение, самоцветов Be-Bi-Sn-W-As	Травянистые растения	0,02	5/75
Борзинский район, Месторождение Сопка Большая	Техногенные массивы (отвалы и хвостохранилище) Bi-Sn-As-Pb-Zn-S	Травянистые растения	0,21	4/60
	Участок за пределами месторождения в составе природной геохимической аномалии Be-Bi-Sn-W-As	Лук-слизун	0,001	1/15
Бaleyский район	Хвостохранилище Sb-As-Ag-Zn-Cu-	Травянистые растения	0,04	5/75
	Участок за пределами техногенных массивов	Травянистые растения	0,001	5/75
Забайкальский край, Могочинский район, вблизи с. Давенда	Хвостохранилище Mo-S-Cu-Bi	Травянистые растения	0,03	38/570
Забайкальский край, Могочинский район, Александровское месторождение Au	Контур карьера вскрыши, почва Mo-S-Cu-Bi-As	Травянистые растения	0,01	24/360
Александровское месторождение Au, верхне-рудная часть	Хвосты обогащения Mo-S-Cu-Bi-As	Травянистые растения	0,02	5/75

Место отбора проб	Вид ландшафта и геохимическая характеристика	Тип биологического объекта	Содержание	Число проб и число исследованных экземпляров
Забайкальский край, Ключевское месторождение Au	Геотехногенные массивы и прилегающий к ним лес Mo-S-Cu-Bi-As-Sb	Грибы маслята	0,1	2
		Лишайники	0,01	5
		Листья брусники	0,01	3/45
Магаданская область, Месторождение Ag-Au Карамкен	Хвостохранилище Ag-S-Cu-Bi-As-Sb	Травянистые растения	0,01	27/405
Забайкальский край, месторождение Мо Жирекен	Хвостохранилище Sn-Cu-Bi Mo-S	Травянистые растения	0,01	19/285
Забайкальский край, р. Черная, район ст. Сбега	Прибрежная часть, фоновый участок	Травянистые растения	0,001	9/135
Забайкальский край, Кыринский район, Хапчеранга	Хвостохранилище Bi-Sn-W-As-Pb-Zn S	Травянистые растения	0,07	21/210

Таблица 9

Величины средних значений КБП селена растениями, произрастающими на почвах и хвостах обогащения руд

Table 9

Values of average values CBA of selenium by plants growing on soils and ore dressing tailings

Рудный район	Содержание Se, г/т			КБП	Геохимическая аномалия
	Хвосты обогащения руд	Почва	Растение		
Шерловогорский: фон	—	0,23	0,001	0,004	Be-Bi-S-F
Шерловая Гора	—	3,03	0,02	0,07	Be-Bi-Sn-W-As
Сопка Большая	3,1	—	0,21	0,42	Bi-Sn-As-Pb-Zn-S
Хапчерангинский	—	3,5	0,07	0,02	Bi-Sn-W-As-Pb-Zn-S
Хапчерангинский	1,9	—	0,07	0,04	Bi-Sn-W-As-Pb-Zn-S
Александровский	—	0,3	0,01	0,033	Mo-S-Cu-Bi-As
Александровский	0,5	—	0,02	0,04	Mo-S-Cu-Bi-As
Жирекенский	0,3	—	0,01	0,033	Sn-Cu-Bi Mo-S

Таблица 10

Содержание селена в съедобной части овощей территорий, прилегающих к определенным природным геохимическим аномалиям, г/т

Table 10

Selenium content in the edible portion of vegetables in areas adjacent to certain natural geochemical anomalies, ppm

Административный район отбора проб	Район геохимических аномалий	Место отбора проб	Съедобная часть		
			Картофель	Морковь	Свекла
Борзинский	Bi-Sn-W-As-S-Pb-Zn	пгт Шерловая Гора	0,003	0,003	0,003
Кыринский	Bi-As-Pb-Zn	с. Верхний Ульхун	0,02	0,001	0,001
	Bi-Sn-W-As-Pb-Zn S	пос. Хапчеранга	0,02	0,04	0,007
Чернышевский	Mo-U-S	с. Старый Олов	0,005	—	—
Приаргунский район	U-Mo-F-S	пос. Молодежный	0,002	—	—
Шилкинский	Bi-Li-Ta-Nb-Rb-Cs	пгт Первомайский	0,001	0,001	—
Балейский	Bi-As-Ag-Cu-Mo	г. Балей	0,001–0,03	0,002	—
	—	с. Ундино-Поселье	0,02	—	—
Газимуро-Заводский	Bi-Pb-Zn	пгт. Газимурский Завод	0,001	—	0,02
Каларский	Нет данных	пос. Куанда	0,001	—	0,001
	То же	с. Чара	0,001	—	—
Читинский район [Никитина, Иванов, 1995]	То же	—	0,17	0,02	0,12
Улетовский район [Никитина, Иванов, 1995]	То же	—	0,008	0,002	0,03
США [Kabata-Pendias, Pendias, 1992]	То же	США	0,011	—	—

В остальных районах отмечено крайне низкое содержание Se. При этом зависимости содержания се-

лена в овощах от принадлежности мест отбора проб к территории с определенной геохимической специ-

ализацией в изученной выборке не обнаружено, поэтому эти данные следует рассматривать как предварительные. С учетом выводов о селенодефицитности территории Забайкальского края, опубликованных в работе [Никитина, Иванов, 1995], следует выполнить специальное исследование по распределению селена в почвах и сельскохозяйственных растениях с использованием современных методов определения его концентраций.

Одной из причин низкого содержания Se в организме человека в Забайкалье может быть детоксикационное действие селена по отношению к металлам при их большом избытке, обусловленное его способностью восстанавливать дисульфидные связи в белках в SH-группы [Авцын и др., 1991], которые затем «улавливают» токсичные концентрации химических элементов, поступающих в организм вместе с ним на селитебных территориях горнопромышленных геосистем. При этом, соединяясь с металлами, селен, понижая их токсикогенное действие, сам выводится из биохимического процесса, требующего его оптимального количества для нормальных физиологических функций органов человека и домашних животных. Образованием биологически недоступных соединений селена с металлами объясняется способность серебра, кадмия и других элементов вызывать у животных вторичную недостаточность селена и блокировать синтез глутатионпероксидазы даже при рационах, содержащих адекватное количество селена.

Исходя из этого важнейшей экологической проблемой геосферных исследований является прогнозирование последствий воздействия хозяйственной деятельности человека на природные и антропогенные экосистемы [Юргенсон, 1994, 2020] и создание моделей минимизации воздействия на окружающую среду.

Заключение

1. Впервые на современном уровне выполнен анализ распространенности селена в Забайкалье и установлено, что минералы селена присутствуют в рудах полиметаллических, золото-полиметаллических, олово-полиметаллических, вольфрамовых и молибденовых месторождений. Содержания его установлены в сульфидах (молибденит, пирит, халькопирит, галенит, сфалерит, тетрадимит, висмутин, лиллианит, алтаит, галенобисмутит, сульфосоли, икунолит) в количествах 0,000n–13,8 %. В основном это сотые – тысячные доли процента, максимума они достигают в тетрадимите (4,9 %), икунолите (7,84 %) и галенобисмутите (13,8 %). В связи с тем, что распространенность минералов с относительно высокими содержаниями Se менее 0,001 %, основными

его носителями и источниками в ландшафте являются галенит, сфалерит, молибденит и халькопирит.

2. Средние содержания Se в изученных рудах составляют (г/т) от 0,5 для пирит-антимонит-ферберит-кварцевой руды до 8,0 для молибденит-халькопирит-полевошпатово-кварцевой при вариации коэффициента концентрации относительно кларка земной коры от 10 для месторождений W до 160 Жирекенского месторождения Mo.

3. Содержания Se в почвах составляет 0,3–3,46 г/т при коэффициентах концентрации 6–78,5, в хвостах обогащения руд – от 0,3 до 3,1 при коэффициенте концентрации 2–90. Извлечение Se зависит от типа разрабатываемых месторождений.

4. Получены первые данные о содержаниях Se в наземных частях растений, которые варьируют от 0,004 до 0,21 г/т. Максимальны содержания его в растениях почв (0,02 г/т) и хвостах обогащения (0,07–0,21 г/т) олово-полиметаллических месторождений, 0,01–0,03 г/т для молибденовых и 0,02–0,04 г/т – золоторудных.

5. Установлена тенденция к возрастанию коэффициента биологического поглощения в растениях, произрастающих на хвостохранилищах, по сравнению с таковыми на почвах и фоновых участках (от 0,02 до 0,42). Установлено отсутствие зависимости между ним и содержаниями Se в почвах и в хвостах обогащения руд, что обусловлено различными соотношениями в них подвижных и неподвижных форм.

6. Одной из причин относительно низкого содержания водорастворимых форм селена, доступных для усвоения растениями, является способность H_2Se вступать в реакцию с металлами (Cu, Zn, Cd, Ag, Ni, Bi, Hg, Sb), образуя нерастворимые комплексы, понижающие биологическую доступность селена и металлов, что способствует снижению их токсичных концентраций повышенными содержаниями селена, который также выводится из подвижного состояния.

7. В связи с возможностью влияния селенодефицита на возникновение болезни Кашина–Бека следует определить целесообразность изучения биогеохимии этого элемента в эндемичных районах Забайкалья.

8. В связи с тем, что четкой зависимости содержания селена в овощах от принадлежности мест отбора проб к территории с определенной геохимической специализацией в изученной выборке не обнаружено, с учетом выводов о селенодефицитности территории Забайкальского края, опубликованных в работе [Никитина, Иванов, 1995], следует выполнить специальное исследование по распределению селена в почвах и сельскохозяйственных растениях с использованием современных методов определения его концентраций для всех выделенных ранее [Юргенсон, 2020] природно-антропогенных геосистем горнопромышленных территорий Забайкалья и прилегающих территорий.

Список источников

- Авцын А.В., Жаворонков А.А., Риш М.А., Строчкова Л.С. Микроэлементозы человека. М. : Медицина, 1991. 496 с.
- Аникина Л.В. Экология селена и его значение в организме // Забайкальский медицинский вестник. 1996. № 1. С. 46–48.
- Балейское рудное поле (геология, минералогия, вопросы генезиса). М. : ЦНИГРИ, 1984. 271 с.
- Белозерцев Ю.А., Иванов В.Н. Экологозависимые состояния и здоровье населения Читинской области // Экологозависимые заболевания (биохимия, фармакология, клиника): тез. докл. Всерос. науч.-практ. конф. Чита, 1997. С. 131–136.
- Бортников Н.С., Мозгова Н.Н., Некрасов И.Я., Розов Д.Н., Тупяков В.Е., Цепин А.И. Особенности висмутовой минерализации золоторудного месторождения в Восточном Забайкалье // Минералогический журнал. 1982. Т. 4, № 4. С. 45–58.
- Виноградов А.П. Средние содержания химических элементов в главных типах изверженных горных пород земной коры // Геохимия. 1962. № 7. С. 555–571.
- Вощенко А.В., Чугаев В.Н., Говорина Л.И., Красницкая В.В. Геохимическая обстановка в очагах Кешанской болезни // Экологические интоксикации: биохимия, фармакология, клиника : тез. докл. Всерос. науч. конф. Чита, 1996. С. 20–21.
- Гавриленко В.В. Экологическая минералогия и геохимия месторождений полезных ископаемых. СПб. : СПб. горный ин-т, 1993. 150 с.
- Голубкина Н.А., Соколов Я.А. Уровень обеспеченности селеном жителей северного экономического района России // Гигиена и санитария. 1997. № 3. С. 22–24.
- Горбунов А.В., Ляпунов С.М., Окина О.И., Фронтасьева М.В. Поступление селена и йода в организм человека с различными рационами питания // Экология человека. 2011. № 10. С. 3–8.
- Дремина Г.А., Прокофьева М.В. Пределы адекватного и безопасного потребления селена человеком в биогеохимических селенодефицитных провинциях // Тезисы докладов Всероссийской научно-практической конференции «Экологозависимые заболевания (биохимия, фармакология, клиника)». Чита, 1997. С. 192–193.
- Кудрявцев А.А. Химия и технология селена и теллура. М. : Высш. шк., 1961. 285 с.
- Минцер Э.Ф., Нечелюстов Г.Н. Ассоциации висмутовых минералов в вольфрамовых месторождениях // Минералогия и геохимия вольфрамовых месторождений. Л. : Изд-во Ленингр. ун-та, 1975. С. 263–272.
- Никитина Л.П., Иванов В.Н. Селен в жизни человека и животных. М. : ВИНТИ, 1995. 242 с.
- Онтоев Д.О. Стадийность минерализации и зональность месторождений Забайкалья. М. : Наука, 1974. 244 с.
- Осипова Т.Р., Понятова Р.М., Вощенко А.В. Болезнь Кешана и биохимический статус в Забайкалье // Микроэлементы в биологии и их применение в сельском хозяйстве и медицине : сб. науч. тр. Самарканд, 1990. С. 292–295.
- Седов К.Р., Иванов В.Н., Вощенко А.В. Болезнь Кешана в Забайкалье // Бюллетень Сибирского отделения АМН СССР. 1988. № 3. С. 86–88.
- Солодухина М.А., Юргенсон Г.А. Мышьяк в ландшафтах Шерловогорского рудного района (Восточное Забайкалье). Чита : Изд-во Забайкал. гос. ун-та, 2018. 176 с.
- Сотников В.И., Берзина А.П., Берзина А.Н., Гимон В.О. Жирекенское медно-молибденовое месторождение // Месторождения Забайкалья. М. : Геоинформмарк, 1995а. С. 180–186.
- Сотников В.И., Берзина А.П., Берзина А.Н., Гимон В.О. Шахтаминское молибденовое месторождение // Месторождения Забайкалья. М. : Геоинформмарк, 1995б. С. 187–192.
- Спиридонов Э.М. Минералогия метаморфизованного Кокчарского плутогенного золото-кварцевого месторождения: (Южный Урал) 2. Золото-висмутовые руды (галенит-шапбахит, Bi- и Bi-Sb-прусит, As-Bi-стефанит, густавит, золото, Вигессит, хедлиит, теллуржозеит, икунолит, галеновисмутит, бончевит, висмут) // Записки РМО. 1996. Т. 125, № 6. С. 1–10.
- Тимофеевский Д.А. Геология и минералогия Дарасунского золоторудного района. М. : Недра, 1972. 260 с.
- Финашин В.К., Литаврина Р.Ф., Романенко И.М., Чубаров В.М. Икунолит Высокогорского месторождения (Приморье) // Записки ВМО. 1979. Т. 108, № 3. С. 337–339.
- Флейшер М. Словарь минеральных видов. М. : Мир, 1990. 206 с.
- Юргенсон Г.А. Зона окисления в многолетнемерзлых породах // Записки ВМО. 1997. Т. 126, № 5. С. 15–27.
- Юргенсон Г.А. Ландшафтно-геохимические и геотические проблемы исторических горнопромышленных территорий на примере Забайкалья // Горный журнал. 2020. № 5. С. 81–86.
- Юргенсон Г.А. Минеральное сырье Забайкалья. Ч. 1, кн. 2: Редкие элементы. Чита : Поиск, 2008. 240 с.
- Юргенсон Г.А. Проблема природных и техногенных взаимодействий на границах геосфер // Устойчивое развитие и: проблемы охраняемых природных территорий и традиционное природопользование в Байкальском регионе. 1994. С. 188–194.
- Юргенсон Г.А., Смирнова О.К., Солодухина М.А., Филенко Р.А. Геохимические особенности руд и техноземов хвостохранилища золото-молибденового рудника Давенда в Восточном Забайкалье // Литосфера. 2016. № 2. С. 91–106.
- Criddle A.J., Stanley C.J. (eds). Quantitative data file for ore minerals. 3rd ed. London : Chapman & Hall, 1993, 243 p.
- Kabata-Pendias A., Pendias H. Trace elements in soils and plants. 2nd ed. Florida, USA : CRC Press, Boca Raton, 1992. 365 p.
- Kato A. Ikunolite, a new bismuth mineral from the Ikuno mine, Japan // Mineral. J. (Japan). 1959. V. 2. P. 397–407.
- Malcolm E. Back. Fleischer's Glossary of Mineral Species 2014. Tucson. The Mineralogical Record Inc. 2014. 420 p.

References

- Avtsyn A.V., Zhavoronkov A.A., Rish M.A., Strochkova L.S. *Mikroelementozy cheloveka* [Human microelementosis]. Moscow: Publishing house «Meditsina», 1991. 496 p. In Russian.
- Anikina L.V. *Ekologiya selena i ego znachenie v organizme* [Ecology of selenium and its importance in the body] // *Zabaykal'skiy meditsinskiy vestnik*. 1996. No. 1. pp. 46–48. In Russian.
- Baleyskoe rudnoe pole (geologiya, mineralogiya, voprosy genezisa)* [Baleyskoye ore field (geology, mineralogy, questions of genesis)]. Moscow: TsNIGRI, 1984. 271 p. In Russian.

- Belozertsev Yu.A., Ivanov V.N. *Ekologozavisimye sostoyaniya i zdorov'e naseleniya Chitinskoj oblasti* [Ecological-dependent states and health of the population of the Chita region] // *Ekologozavisimye zabolovaniya (biokhimiya, farmakologiya, klinika): tezisy dokl. Vseros. nauch.-prakt. konf. Chita, 1997.* pp. 131–136. In Russian.
- Bortnikov N.S., Mozgova N.N., Nekrasov I.YA., Rozov D.N., Tupyakov V.Ye., Tsepin A.I. *Osobennosti vismutovoy mineralizatsii zolotorudnogo mestorozhdeniya v Vostochnom Zabaykal'ye* [Features of bismuth mineralization of a gold ore deposit in Eastern Transbaikalia] // *Mineralogical journal*, 1982. V. 4, No. 4, pp. 45–58. In Russian.
- Vinogradov A.P. *Srednie sodержaniya khimicheskikh elementov v glavnykh tipakh izverzhennykh gornykh porod zemnoy kory* [Medium content of chemical elements in the main types of igneous rocks of the earth's crust] // *Geokhimiya – Geochemistry international*, 1962, No. 7, pp. 555–571. In Russian.
- Voshchenko A.V., Chugaev V.N., Govorina L.I., Krasnitskaya V.V. *Geokhimicheskaya obstanovka v ochagakh Keshanskoy bolezni* [Geochemical situation in the foci of the Keshan disease] // *Ekologicheskie intoksikatsii: biokhimiya, farmakologiya, klinika: tezisy dokl. Vseros. nauchn. konf. Chita, 1996.* pp. 20–21. In Russian.
- Gavrilenko V.V. *Ekologicheskaya mineralogiya i geokhimiya mestorozhdeniy poleznykh iskopaemykh*. [Ecological mineralogy and geochemistry of mineral deposits]. St. Petersburg: St. Petersburg gornyy institut, 1993. 150 p. In Russian.
- Golubkina N.A., Sokolov Ya.A. *Uroven' obespechennosti selenom zhiteley severnogo ekonomicheskogo rayona Rossii* [The level of provision with selenium for residents of the northern economic region of Russia] // *Gigiena i sanitariya*. 1997. No. 3. pp. 22–24. In Russian.
- Gorbunov A.V., Lyapunov S.M., Okina O.I., Frontas'eva M.V. *Postuplenie seleni i yoda v organizm cheloveka s razlichnymi ratsionami pitaniya* [The intake of selenium and iodine into the human body with different diets] // *Ekologiya cheloveka*. 2011. No. 10. pp. 3–8. In Russian.
- Dremina G.A., Prokof'eva M.V. *Predely adekvatnogo i bezopasnogo potrebleniya seleni chelovekom v biogeokhimicheskikh sele-nodefitsitnykh provintsiyakh* [Limits of adequate and safe selenium consumption by humans in biogeochemical selenium-deficient provinces] // *Tezisy dokladov Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Ekologozavisimye zabolovaniya (biokhimiya, farmakologiya, klinika)»*. Chita, 1997. pp. 192–193. In Russian.
- Kudryavtsev A.A. *Khimiya i tekhnologiya seleni i tellura* [Chemistry and technology of selenium and tellurium]. Moscow: Publishing house Vysshaya shkola, 1961. 285 p. In Russian.
- Mintser E.F., Nechelyustov G.N. *Assotsiatsii vismutovykh mineralov v vol'framovykh mestorozhdeniyakh* [Associations of bismuth minerals in tungsten deposits] // *Mineralogiya i geokhimiya vol'framovykh mestorozhdeniy*. Leningrad: Izd-vo Leningr. un-ta, 1975. pp. 263–272. In Russian.
- Nikitina L.P., Ivanov V.N. *Selen v zhizni cheloveka i zhivotnykh* [Selenium in life of human and animals]. Moscow: VINITI, 1995. 242 p. In Russian.
- Ontoev D.O. *Stadiynost' mineralizatsii i zonal'nost' mestorozhdeniy Zabaykal'ya* [Stages of mineralization and zoning of deposits in Transbaikalia]. Moscow: Publishing house «Nauka», 1974. 244 p. In Russian.
- Osipova T.R., Ponyatova R.M., Voshchenko A.V. *Bolezn' Keshana i biokhimicheskii status v Zabaykal'e* [Keshan's disease and biochemical status in Transbaikalia] // *Mikroelementy v biologii i ikh primeneniye v sel'skom khozyaystve i meditsine: sbornik nauchnykh trudov*. Samarkand, 1990. pp. 292–295. In Russian.
- Sedov K.R., Ivanov V.N., Voshchenko A.V. *Bolezn' Keshana v Zabaykal'e* [Keshan's disease in Transbaikalia] // *Byul. Sib. otdeleniya AMN SSSR*. 1988. No. 3. pp. 86–88. In Russian.
- Solodukhina M.A., Yurgenson G.A. *Mysh'yak v landshaftakh Sherlovogorskogo rudnogo rayona (Vostochnoe Zabaykal'e)* [Arsenic in the landscapes of the Sherlovogorsk ore region (Eastern Transbaikalia)]. Chita: Izd-vo Zabaykal'sk. Gos. universiteta, 2018. 176 p. In Russian.
- Sotnikov V.I., Berzina A.P., Berzina A.N., Gimon V.O. *Zhirekenskoe medno-molibdenovoe mestorozhdenie* [Zhireken copper-molybdenum deposit] // *Mestorozhdeniya Zabaykal'ya* Moscow: Publishing house Geoinformmark, 1995a. pp. 180–186. In Russian.
- Sotnikov V.I., Berzina A.P., Berzina A.N., Gimon V.O. *Shakhtamenskoe molibdenovoe mestorozhdenie* [Shakhtamenskoe molybdenum deposit] // *Mestorozhdeniya Zabaykal'ya* Moscow: Publishing house Geoinformmark, 1995b. pp. 187–192. In Russian.
- Spiridonov E.M. *Mineralogiya metamorfizovannogo Kokcharskogo plutonogennogo zoloto-kvartsevoogo mestorozhdeniya: (Yuzhnyy Ural) 2. Zoloto-vismutovye rudy (galenit-shapbakhit, Bi- i Bi-Sb-prustit, As-Bi-stefanit, gustavit, zoloto, Bi-gessit, khedliit, tellurhozeit, ikunolit, galenovismutit, bonchevit, vismut)* [Mineralogy of the metamorphosed Kokcharsky plutogenic gold-quartz deposit: (Southern Urals) 2. Gold-bismuth ores (galena-shabakhite, Bi- and Bi-Sb-proustite, As-Bi-stephanite, gustavite, gold, Bi-hessite, hedliite, tellurhozeit, ikunolite, galenobismutite, bonchevite, bismuth)] // *Zapiski RMO*. 1996. V. 125, No. 6. pp. 1–10. In Russian.
- Timofeevskiy D.A. *Geologiya i mineralogiya Darasunskogo zolotorudnogo rayona* [Geology and mineralogy of the Darasun gold ore region]. Moscow: Publishing house Nedra, 1972. 260 p. In Russian.
- Finashin V.K., Litavrina R.F., Romanenko I.M., Chubarov V.M. *Ikunolit Vysokogorskogo mestorozhdeniya (Primor'e)* [Ikunolit of the Vysokogorsk deposit (Primorye)] // *Zapiski VMO*. 1979. V. 108, No. 3. pp. 337–339. In Russian.
- Fleysher M. *Slovar' mineral'nykh vidov* [Dictionary of Mineral Species.]. Moscow: Publishing house Mir, 1990. 206 p. In Russian.
- Yurgenson G.A. *Zona okisleniya v mnogoletnemerzlykh porodakh* [Oxidation zone in permafrost] // *Zapiski VMO*, 1997, V. 126, No. 5. pp. 15–27. In Russian.
- Yurgenson G.A. *Landshaftno-geokhimicheskie i geoticheskie problemy istoricheskikh gornopromyshlennykh territoriy na primere Zabaykal'ya* [Landscape-geochemical and geoethical problems of historical mining territories on the example of Transbaikalia] // *Gornyy zhurnal*. 2020. No. 5. pp. 81–86. In Russian.
- Yurgenson G.A. *Mineral'noye syr'e Zabaykal'ya* [Mineral raw materials of Transbaikalia]. Part 1, Book 2. Redkie elementy. Chita: Poisk, 2008. 240 p. In Russian.
- Yurgenson G.A. *Problema prirodnnykh i tekhnogennykh vzaimodeystviy na granitsakh geosfer* [The problem of natural and man-made interactions at the boundaries of geospheres] // *Ustoychivoe razvitiye i: problemy okhranyaemykh prirodnnykh territoriy i traditsionnoye prirodoopol'zovanie v Baykal'skom regione*. 1994. pp. 188–194. In Russian.
- Yurgenson G.A., Smirnova O.K., Solodukhina M.A., Filenko R.A. *Geokhimicheskie osobennosti rud i tekhnoslov khvostokhranilishcha zoloto-molibdenovogo rudnika Davenda v Vostochnom Zabaykal'e* [Geochemical features of ores and technosols of the tailing dump of the Davenda gold-molybdenum mine in Eastern Transbaikalia] // *Litosfera*. 2016. No. 2. pp. 91–106. In Russian.

- Criddle, A.J., Stanley C.J., Eds. Quantitative data file for ore minerals, 3rd ed. Chapman & Hall, London, 1993. 243 p.
Kabata-Pendias A., Pendias H. Trace elements in soils and plants (2nd ed). Florida, USA: CRC Press, Boca Raton, 1992. 365 p.
Kato A. Ikunolite, a new bismuth mineral from the Ikuno mine, Japan // Mineral. J. (Japan). 1959. 2. pp. 397–407.
Malcolm E. Back. Fleischer's Glossary of Mineral Species 2014. Tucson. The Mineralogical Record Inc. 2014. 420 p.

Информация об авторах:

Юргенсон Г.А., доктор геолого-минералогических наук, профессор, главный научный сотрудник, лаборатория геохимии и рудогенеза, Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, Чита, Россия.

E-mail: yurgga@mail.ru

Солодухина М.А., кандидат географических наук, старший научный сотрудник, лаборатория геохимии и рудогенеза, Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, Чита, Россия.

E-mail: mabn@ya.ru

Филенко Р.А., научный сотрудник, лаборатория геохимии и рудогенеза, Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, Чита, Россия.

E-mail: filrom@yandex.ru

Михайлова Л.А., кандидат медицинских наук, заведующая кафедрой гигиены, Читинская государственная медицинская академия, Чита, Россия.

E-mail: mihailova-la@mail.ru

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Yurgenson G.A., Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Professor, Chief Researcher, Laboratory of Geochemistry and Ore Genesis, Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology SB RAS, Chita, Russia.

E-mail: yurgga@mail.ru

Solodukhina M.A., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Researcher, Laboratory of Geochemistry and ore genesis, Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology of SB RAS, Chita, Russia.

E-mail: mabn@ya.ru

Filenko R.A., Researcher, Laboratory of Geochemistry and ore genesis, Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology SB RAS, Chita, Russia.

E-mail: filrom@yandex.ru

Mikhailova L.A., Cand. Sci. (Medicine), Head of the department of hygiene, Chita State Medical Academy, Chita, Russia.

E-mail: mihailova-la@mail.ru

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 04.03.2021; одобрена после рецензирования 26.10.2021; принята к публикации 12.09.2022

The article was submitted 04.03.2021; approved after reviewing 26.10.2021; accepted for publication 12.09.2022