УДК 550.47 DOI: 10.15372/KhUR2023434 EDN: DOBZBI

# Атмосферная эмиссия ртути с поверхности Урского отвала (Кемеровская область)

С. Б. БОРТНИКОВА<sup>1</sup>, А. Ю. ДЕВЯТОВА<sup>1,2</sup>, Н. В. ЮРКЕВИЧ<sup>1</sup>, А. В. ЕДЕЛЕВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, Новосибирск (Россия)

E-mail: BortnikovaSB@ipgg.sbras.ru

<sup>2</sup>Новосибирский государственный университет, Новосибирск (Россия)

(Поступила 02.06.22; после доработки 29.07.22)

### Аннотация

Представлены результаты полевых исследований эмиссии ртути из вещества хранилища отходов цианирования зоны окисления Ново-Урского колчеданно-полиметаллического месторождения (пос. Урск, Кемеровская обл.). Установлено, что содержание ртути в приземном слое атмосферы над поверхностью отвала колеблется в диапазоне 20-3600 нг/м<sup>3</sup> при среднесуточной предельно допустимой концентрации (ПДК<sub>сс</sub>) 300 нг/м<sup>3</sup>, что превышает ПДК<sub>сс</sub> в отдельных точках в 12 раз. Региональный фон над поверхностью отвала в среднем превышен в 570 раз. При сравнении результатов измерений в утреннее и вечернее время обнаружено, что к вечеру концентрация ртути возрастает. Это связано с активной эмиссией ртути под воздействием солнечной радиации и нагреванием поверхности отвала. Построены численные модели распространения ртути с использованием методов математического моделирования. Согласно модели, построенной на основе максимальных замеренных концентраций, весь пос. Урск находится в зоне очень высоких концентраций паров ртути. При расчете по усредненным концентрациям безопасный уровень достигается на расстоянии 600 м от отвала, но в границах поселка. Полученные результаты свидетельствуют об опасности воздействия ртути на население поселка, а также ставят проблему детального изучения состава воздуха над старыми хранилищами отходов золотодобычи.

**Ключевые слова:** сульфидные хвостохранилища, газовый перенос ртути, загрязнение атмосферного воздуха, математическое моделирование

### введение

В атмосфере ртуть существует в трех формах. Основная форма — газообразная элементарная ртуть (GEM), составляющая более 90 % от общего содержания ртути. Средняя продолжительность ее существования в атмосфере составляет от 1 до 2 лет. Определение именно этой формы ртути проводилось в данной работе.

Реактивная газообразная (RGM) – вторая по распространенности форма ртути в атмосфере.

Она представляет собой химическую форму двухвалентной ртути – Hg(II), в основном оксид металла (HgO). Эти формы ртути обладают высокой реакционной способностью и растворимы в воде (пар, дождь, туман, снег). Поэтому в воздухе во взвешенном состоянии RGM остается от нескольких часов до нескольких дней, а затем уносится водным конденсатом (дождь, снег и т. д.).

Сорбированная на частицах ионная ртуть (HgP) – самая редко встречающаяся форма, по-

скольку, осаждаясь вместе с частицами, долго существовать в атмосфере не может [1].

Существуют две группы источников поступления ртути и ее соединений в окружающую среду – природные и антропогенные. Природными источниками являются верхняя мантия Земли, месторождения ртутьсодержащих руд, откуда ртуть попадает в атмосферу в процессах выветривания горных пород, а также при земной и подводной вулканической деятельности. Основные техногенные источники поступления ртути в атмосферу – добыча золота (остаточные отходы амальгамирования концентратов), сжигание угля, цветная металлургия, производство цемента и др. [2].

Применение ртути для добычи золота с использованием способа амальгамации в России было запрещено более 30 лет назад. Согласно ориентировочным оценкам, эмиссия ртути в окружающую среду при осуществлении данного вида деятельности может составлять 1.5-6.5 т/год. Известно, что за всю историю золотодобычи в России было использовано более 6000 т ртути, поэтому количество ее, потенциально способное поступить в окружающую среду при извлечении золота из техногенного сырья, может быть очень значительным [3].

В настоящее время источниками ртутного загрязнения золотодобывающих регионов служат отвалы и хранилища складированных отходов. В результате наблюдается загрязнение природных экосистем и селитебных зон в районах воздействия золотодобычи. Исследований по оценке степени загрязнения территорий Сибири, Дальнего Востока и Урала, к сожалению, выполнено немного [3–6].

Как показывают результаты исследований, наиболее сильное ртутное загрязнение обнаружено вблизи золотоизвлекательных фабрик, где ртуть непосредственно использовалась в технологических процессах. Установлено, что содержание ртути в объектах окружающей среды может превышать ПДК в 4-100 раз [3]. Зарегистрированы следующие максимальные концентрации ртути: в почвах - 18.9 мг/кг (9 ПДК), общее содержание в грунтовых водах – 32.8 мкг/л (65 ПДК для питьевых вод), в природных водотоках – 40 нг/л (4 ПДК для рыбохозяйственных водоемов), в донных отложениях - 54.2 мг/кг [4]. Чрезвычайно высокие концентрации ртути - 1000-2000 мг/кг (50-100 ПДК для почв) зарегистрированы в хвостах обогащения и загрязненных грунтах вблизи установок по получению и переработке золотосодержащих концентратов [5]. В ряде районов (Красноярск, Чита, Благовещенск, Хабаровск) разрабатываются и применяются технологии по утилизации такого сырья с выделением золота и ртути [6]. Следовательно, большая часть техногенных и селитебных территорий традиционной золотодобычи характеризуются различной степенью ртутной загрязненности – от опасных до допустимых.

Ртуть и ее соединения относятся к веществам I класса опасности и являются приоритетными токсикантами, причем наибольшую опасность для окружающей среды и живых организмов представляют органические производные ртути, а именно монометилртуть  $(CH_{a}Hg^{+})$ , которая характеризуется высокой стабильностью и выраженным кумулятивным эффектом [5]. Кроме того, высокая токсичность ртути и ее отходов объясняется и некоторыми физико-химическими свойствами, позволяющими сравнивать ртутное загрязнение с радиоактивным. Это высокая летучесть ртути и ее соединений, увеличивающаяся в прогрессии при повышении температуры окружающей среды; устойчивость во внешней среде; растворимость паров ртути в атмосферных осадках; способность к сорбции почвой и адсорбции взвешенными частицами из водной среды; отсутствие запаха и вкуса.

Проведено большое количество исследований, посвященных парам элементарной ртути (GEM) в атмосфере городов и прилежащих территорий [7–13] и над поверхностью морей [14–16]. Большинство работ, связанных с изучением хвостохранилищ, направлено на исследование распределения ртути между компонентами системы: почвами, отходами, поверхностными и поровыми водами, донными отложениями и растениями [4, 5, 17–22]. При этом, несмотря на ее летучесть, вопросы, связанные с атмосферной эмиссией  $Hg^0$  от отходов переработки золотосодержащих руд, затронуты в гораздо меньшей степени.

Мониторинг ртути в атмосфере Земли осуществляется Глобальной сетью мониторинга ртути (GMOS), единственной стационарной точкой наблюдения этой сети в пределах Сибири является станция Листвянка, созданная на базе Лимнологического института СО РАН [23]. Согласно данным этой станции, региональный фон ртути в зимний период составляет 1.6–1.8 нг/м<sup>3</sup>, в летний – 1.1–1.2 нг/м<sup>3</sup>.

Цель нашего исследования – определить содержание ртути в районе Урского отвала в сравнении с фоновыми значениями для Западной Сибири и ПДК в воздухе населенных мест [24], построить модели распространения этого элемента в приземном слое атмосферы и оценить опасность ее ореолов в воздухе.

### ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Ново-Урское месторождение полиметаллических золотосодержащих медно-цинковых серноколчеданных руд разрабатывалось в 1930-х годах в пос. Урск. Отвал сформирован в 30-40-х годах XX века и содержит отходы переработки зоны окисления Ново-Урского месторождения. Отходы цианирования кварц-баритовой сыпучки (самая верхняя, наиболее окисленная часть рудных тел) и кварц-пиритовой сыпучки складировались рядом в пойме ручья в два насыпных отвала без защитных технических сооружений или дамб. В результате были сформированы насыпи высотой 10-12 м [25]. В складированных отходах Урского хвостохранилища содержание Hg (в виде примесей в основных сульфидных минералах Ново-Урского месторождения) было достаточно высокое (в первичных - около 100 мкг/г, в окисленных - 20-30 мкг/г), что обеспечило ее повышенный местный фон. Само вещество отходов было разнесено и в настоящее время покрывает лог, образуя в плане конус снесенного вещества (рис. 1). Заболоченная территория лога ниже хвостохранилища вплоть до р. Ур покрыта материалом отходов, образовав тем самым поток рассеяния. Авторами [7] установлено, что вблизи отвалов колодезные и родниковые воды не пригодны к использованию вследствие высокого содержания в них ртути. Также определена метилированная форма ртути в растениях и рыбе в концентрациях, существенно превышающих ПДК [7]. Ранее, при изучении состава приземного слоя атмосферы в районе отвала, нами были определены аномалии серо- и селенсодержащих газов [26]. Исследование состава воздуха было продолжено определением паров ртути на данной местности.

В июне 2021 г. нами были выполнены полевые замеры концентраций ртути в приземном слое атмосферы на отвале и прилегающих территориях. Ртутная съемка проводилась по четырем профилям, в общей сложности 22 точки наблюдения (см. рис. 1). Кроме того, измерения проводились рядом с жилой зоной. Наблюдения велись три дня подряд (2, 3, 4 июня 2021 г.) в утреннее (9:00–11:00) и вечернее время (16:00– 18:00), производилось по девять замеров в каждой точке с помощью универсального переносного анализатора ртути (ртутеметрического комплекса) УКР-1МЦ (Россия).

В основе работы комплекса лежит беспламенный атомно-абсорбционный метод, базирующийся на измерении поглощения излучения с длиной волны 253.7 нм атомами ртути, содержащимися в воздухе, путем восстановления до элементного состояния. Анализатор УКР-1МЦ является компактным переносным устройством,





Рис. 1. Географическое положение объекта исследования (*a*) и схема измерений на отвале и прилегающей территории на основе космоснимка (б).

содержит в себе элементы двухлучевого атомноабсорбционного фотометра: источник излучения, измерительные кюветы, амальгаматор, фотоприемники с максимумом спектральной чувствительности в диапазоне длин волны 220-260 нм, микронасос, датчик расхода анализируемого воздуха, измерительный блок. Ртутеметрический комплекс УКР-1МЦ использует в своей работе два принципа измерений. Первый основан на дискретном измерении концентрации паров ртути в воздухе с предварительным накоплением ртути на коллекторе. Второй - на прямом измерении резонансного поглощения излучения паром атомарной ртути. Объем пробы: от 0.1 до 10 дм<sup>3</sup>. Время измерения: от 6 с до 10 мин. Диапазон измерения: от 10 до 50 000 нг/м<sup>3</sup>. Пределы допускаемого значения относительной погрешности измерения ртути в воздухе: не более ±20 % [27].

При обработке полученных результатов были использованы методы математического моделирования для построения моделей распространения ртути в атмосфере.

Расчеты проводились с помощью математической модели, предложенной В. Ф. Рапутой и А. Ю. Девятовой [28]. Исходными данными для моделей служат измеренные концентрации ртути в воздухе, роза ветров, а также характеристики источника выбросов. В результате моделирования мы получаем площадную зависимость распространения примесей в атмосфере.

Расчеты основывались на следующих формулах:

 $\Phi(r, \varphi, \vec{\theta}) = \theta_1 r^{\theta_2} e^{-\frac{2r_m}{r}} P(\varphi + 180^\circ)$ (1)

где  $\Phi(r, \phi)$  – концентрация примеси в атмосфере; P( $\phi$ ) – приземная роза ветров;  $r, \phi$  – полярные координаты.

$$\theta_{1} = \frac{cQB(2r_{m})^{w}}{2(1+n)\sqrt{\pi}\phi_{0}\Gamma(1+w)},$$
  
$$\theta_{2} = -\frac{w}{K_{1}(1+n)} - 2$$
(2)

где c – параметр, характеризующий оседание примеси на поверхность;  $K_1$ - коэффициент обмена; w – скорость гравитационного оседания частиц примеси;  $\Gamma$  – гамма-функция; n – степень однородности распределения частиц; B – параметр, характеризующий турбулентность; Q – мощность источника;  $r_m$  – расстояние от источника до точки отбора пробы,  $\phi_0$  – угол, соответствующий направлению отбора проб.

Параметр  $r_m$  оценивается по геометрическим характеристикам источника с целью минимизации погрешностей измерений.

Параметры  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  – это натурные наблюдения, которые ложатся в основу модели: по методу наименьших квадратов выбираются измеренные концентрации в двух опорных точках ( $\theta_1$ ,  $\theta_2$ ), остальные точки используются для верификации модели [29].

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

## Концентрации ртути в приземном слое атмосферы над отвалом и прилегающей территорией

Результаты измерений паров ртути над поверхностью Урского отвала свидетельствуют об интенсивных процессах эманации ртути из отвального вещества. На рис. 2 показаны максимальные измеренные значения концентрации (a) и усредненные концентрации (б) в точках отбора (утреннее и вечернее время, всего 9 измерений для каждой точки). Значения концентраций Hg<sup>0</sup> в воздухе над хранилищем колеблются в диапазоне 20-3600 нг/м<sup>3</sup> при ПДК<sub>сс</sub> 300 нг/м<sup>3</sup>, наиболее высокие концентрации (более 1000 нг/м<sup>3</sup>) совпадают с конусом выноса и приоритетным направлением ветра, характерным для данной территории в летний период. Измеренные величины содержания Hg<sup>0</sup> над поверхностью хвостохранилища превышают региональный фон примерно в 16-3000 раз. В среднем (для всех измерений в точках наблюдения) ПДК превышен в 2 раза, а региональный фон – в 570 раз.

При сравнении результатов измерений в утреннее и вечернее время, обнаружено, что для большинства точек к вечеру концентрация ртути возрастает, что связано с нагревом отвального вещества в течение дня. Наиболее высокая концентрация ртути наблюдалась в точке 16 в вечернее (3600 нг/ $m^3$ ), а также в утреннее время суток (3300 нг/м<sup>3</sup>), что превышает ПДК в 12 и 11 раз соответственно. Данная точка находится у подножия отвала в низине, на конусе выноса; такие условия способствуют накоплению примесей в приземном воздухе. Повышенные содержания ртути наблюдаются в районе колонки (250-1680 нг/м<sup>3</sup>) и жилого дома (80-440 нг/м<sup>3</sup>). Минимальное значение – 20 нг/м<sup>3</sup>, зафиксировано в точке 2, располагающейся в центре небольшого лесного массива, который экранирует солнечные лучи и ветровой перенос.

### Модели распространения ртути

Применение численных методов позволило рассчитать поля концентраций распростране-



Рис. 2. Концентрации ртути, измеренные в точках наблюдения: *a* – максимальные значения; б – усредненные значения (*n* = 9).

ния ртути над Урским отвалом и прилегающей территорией. В качестве исходных данных использовались максимальные и средние концентрации, а также метеорологические данные с ближайшей к объекту исследования станции Тисуль (Кемеровская обл.) [30].

● 290-500 ● 590-770 ● 1200-2000 ● 2200-3600

По результатам моделирования обнаружены контрастные ореолы ртути (рис. 3), основное направление выноса с северо-запада на юго-восток, т. е. ветровой снос захватывает в основном южную часть поселка. Но и остальная его территория находится в зоне значений, существенно превышающих ПДК<sub>сс</sub>, если судить по модели, учитывающей максимальные концентрации (см. рис. 3, *a*). При расчете по усредненным данным безопасный уровень достигается на расстоянии 600 м от отвала в границах поселка (см. рис. 3, *б*).

В вечернее время, когда эманация ртути возрастает и концентрации последней в воздухе достигают максимальных значений, распространение этого элемента происходит на более чем 25 км в подветренную сторону от отвала. При этом миграция Hg<sup>0</sup> может идти дальше (за счет осаждения на поверхности водных объектов, с атмосферными осадками и т. д.) по трофическим цепям, попадая в организм человека. Помимо этого, в газообразной форме ртуть может существовать в атмосфере Земли около года [1], рассеиваясь в ней и внося свой вклад в глобальные процессы переноса ртути.

• 110-280 • 310-1000 • 1200-2300

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как показали полевые наблюдения и численные модели, сульфидные отходы цианирования золотосодержащих руд Урского месторождения представляют собой постоянный источник загрязнения атмосферы ртутью, причем не только над пос. Урск. За счет ветрового переноса ореолы распространения ртути достигают 25 км.

Содержание ртути над поверхностью хвостохранилица колеблется в диапазоне 203-600 нг/м<sup>3</sup> при ПДК<sub>сс</sub> 300 нг/м<sup>3</sup>, т. е. в отдельных точках концентрации ртути превышают ПДК в 12 раз. При этом превышение регионального фона составляет 16-3000 раз. По средним значениям региональный фон для летнего периода превышен в 570 раз.

При сравнении результатов измерений в утреннее и вечернее время обнаружено, что к вечеру концентрация ртути возрастает. Это связано с активной эмиссией ртути под воздействием солнечной радиации.

Построены численные модели распространения ртути с использованием методов математи-

#### С. Б. БОРТНИКОВА и др.



Рис. 3. Рассчитанные поля концентраций распространения ртути над Урским отвалом и прилегающей территорией: *a* – на основе максимальных концентрации; б – на основе усредненных значений концентраций. Черная линия – граница пос. Урск.

ческого моделирования. Ветровой снос захватывает южную часть пос. Урск. При расчете по усредненным концентрациям безопасный уровень достигается на расстоянии 600 м от отвала, но в границах поселка. Модель, построенная с учетом максимальных значений, свидетельствует, что в условиях интенсивных эманаций на территории всего поселка уровень ртути в воздухе превышает ПДК<sub>сс</sub>.

В вечернее время, когда эманация ртути возрастает и концентрация последней в воздухе достигают максимальных значений, распространение этого элемента происходит на десятки километров в подветренную сторону от отвала.

Работа выполнена в рамках базового проекта ИНГГ СО РАН (№ 0266-2022-0028) и при финансовой поддержке РФФИ (грант № 20-05-00126).

Авторы благодарят аспирантов лаборатории № 1105 ИНГГ СО РАН Т. А. Кулешову и К. Ю. Тулисову за участие в полевых работах.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Zhang L., Lyman S., Mao H., Lin C.-J., Gay D. A., Wang S., Sexauer Gustin M., Feng X., Wania F. A synthesis of research needs for improving the understanding of atmospheric mercury cycling // Atmos. Chem. Phys. 2017. Vol. 17, No. 14. P. 9133-9144.

- 2 AMAP/UN Environment 2019. Technical Background Report for the Global Mercury Assessment 2018 [Electronic resource]. URL: https://www.amap.no/documents/doc/Technical-Background-Report-for-the-Global-Mercury-Assessment-2018/1815 (accessed 20.11.2022).
- 3 Алакаева Р. А. Некоторые аспекты опасности ртутного загрязнения среды при извлечении золота из руды методом прямого цианирования // Сб. материалов 3-й научнотехнической конференции "Ртуть. Комплексная система безопасности". СПб., 1999. С. 62–66.
- 4 Кутлиахметов А. Н. Ртутное загрязнение ландшафтов горнорудными предприятиями Башкирского Зауралья: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Екатеринбург, 2002. 25 с.
- 5 Лапердина Т. Г. Ртутное загрязнение окружающей среды в зонах влияния золотодобывающих предприятий Забайкалья // Химия уст. разв. 1995. Т. 3, № 3. С. 57-67.
- 6 Оценка поступлений ртути в окружающую среду с территории Российской Федерации [Electronic resource]. URL: https://www2.mst.dk/udgiv/Publikationer/2005/87-7614-541-7/html/helepubl\_rus.htm (accessed 20.01.2022).
- 7 Густайтис М. А., Мягкая И. Н., Щербов Б. Л., Лазарева Е. В. Загрязнение ртутью окружающей среды после эксплуатации Ново-Урского золоторудного месторождения (Кемеровская область) // Изв. Иркутского гос. ун-та. Сер.: Науки о Земле. 2016. Т. 18. С. 14-24.
- 8 Гавриленко В. В., Адясов Я. В. Ртуть в воздухе Санкт-Петербурга // Сб. трудов конференции "Геология, геоэкология, эволюционная география". СПб., 28 февр.—01 марта 2014. С. 143—146.
- 9 Страховенко В. Д., Маликова И. Н., Щербов Б. Л. Распределение ртути в компонентах окружающей среды Сибири // Химия уст. разв. 2012. Т. 20, № 1. С. 117–123.
- 10 Китайкина М. Н. Оценка уровня загрязнения атмосферы ртутью в городе Ханты-Мансийск // Вестн. Тюменского гос. ун-та. Экология и природопользование. 2017. Т. 3, № 2. С. 47-55.

- 11 Фурсов В. З. Загрязнение компонентов среды Москвы ртутью и другими химическими элементами // Разведка и охрана недр. 2012. № 7. С. 13–17.
- 12 Шоль Л. В., Эйрих С. С., Ильина Е. Г. Оценка концентраций и потоков ртути, поступающих из атмосферы на территорию Ямало-Ненецкого автономного округа // Изв. Алтайского отд-ния Русского геогр. об-ва. 2020. № 4 (59). С. 83-94.
- 13 Камардина В. В., Эйрих С. С., Щербакова Л. В. Влияние ТЭЦ на поступление ртути в атмосферу в зимний период на основе анализа снежного покрова в черте г. Барнаула // Сб. материалов VI Региональной молодежной конференции, XLVI Научной конференции студентов, магистрантов, аспирантов и учащихся лицейных классов "Мой выбор – наука!". Барнаул, 17–27 апреля 2019. С. 1280–1284.
- 14 Калинчук В. В. Пространственно-временная изменчивость концентрации атомарной ртути (Hg<sup>0</sup>) в приводном слое атмосферы в Беринговом море летом 2013 г. // Геология морей и океанов. Материалы XXI Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. Т. 4. Москва, 16-20 ноября 2015. С. 160-162.
- 15 Лопатников Е. А., Калинчук В. В. Газообразная элементарная ртуть (Hg(0)) в приземной атмосфере и потоки Hg(0) с поверхности моря в атмосферу в Японском море в декабре 2018 года // Геология морей и океанов. Материалы XXIII Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. Т. 4. Москва, 18-22 ноября 2019. С. 268-271.
- 16 Матишов Г. Г., Голубева Н. И., Бурцева Л. В. Исследования уровней концентрации газообразной ртути в атмосферном воздухе над Баренцевым и Карским морями // Доклады Академии наук. 2002. Т. 382, № 5. С. 692-694.
- 17 Мягкая И., Лазарева Е., Густайтис М., Кириченко И., Сарыг-оол Б. Ртуть в почвах и воздухе в районах антропогенных ореолов рассеяния и с повышенным природным геохимическим фоном // Экология и промышленность России. 2022. Т. 26, № 2. С. 44–50.
- 18 Saryg-ool B. Yu., Myagkaya I. N., Kirichenko I. S., Gustaytis M. A., Shuvaeva O. V., Zhmodik S. M., Lazareva E. V. Redistribution of elements between wastes and organicbearing material in the dispertion train of gold-bearing sulfide tailings: Part I. Geochemistry and mineralogy // Sci. Total Environ. 2017. Vol. 581–582. P. 460–471.
- 19 Густайтис М. А., Мягкая И. Н., Сарыг-оол Б. Ю., Лазарева Е. В. Распределение ртути в донных отложениях водных объектов в зоне влияния Урского хвостохранилища (Кемеровская область) // Вестн. Воронежского гос. ун-та. Сер.: Геология. 2017. № 4. С. 114–122.
- 20 Густайтис М. А., Мягкая И. Н., Сарыг-Оол Б. О. Ю., Лазарева Е. В. Распределение ртути в донных отложениях

водных объектов в зоне влияния Урского хвостохранилища (Кемеровская область) // Материалы XXVIII Всероссийской молодежной конференции земной коры "Строение литосферы и геодинамика". Иркутск, 08–14 апреля 2019. С. 57–60.

- 21 Маликова И. Н., Аношин Г. Н., Бадмаева Ж. О. Подвижные формы ртути в почвах природных и природнотехногенных ландшафтов // Геология и геофизика. 2011. Т. 52, № 3. С. 409–425.
- 22 Маликова И. Н., Страховенко В. Д. Корреляционные связи ртути в почвах и донных отложениях оз. Большое Яровое // Химия уст. разв. 2017. Т. 25, № 2. С. 195–203.
- 23 Машьянов Н. Р., Оболкин В. А., Ходжер Т. В., Шолупов С. Е., Рыжов В. В., Погарев С. Е. Проект GMOS (Global Mercury Observation System). Мониторинг атмосферной ртути на станции Листвянка // Второй международный симпозиум "Ртуть в биосфере: Эколого-геохимические аспекты". Новосибирск, 21–25 сент. 2015. С. 258–261.
- 24 СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. (Утв. Постановлением от 28.01.2021 № 2) [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://fsvps.gov.ru/sites/default/files/ npa-files/2021/01/28/sanpin1.2.3685-21.pdf (дата обращения: 29.07.2022).
- 25 Оленченко В. В., Кучер Д. О., Бортникова С. Б., Гаськова О. Л., Еделев А. В., Гора М. П. Вертикальное и латеральное распространение высокоминерализованных растворов кислого дренажа по данным электротомографии и гидрогеохимии (Урской отвал, Салаир) // Геология и геофизика. 2016. Т. 57, № 4. С. 782–795.
- 26 Yurkevich N., Bortnikova S., Abrosimova N., Makas A., Olenchenko V., Yurkevich Nic., Edelev A., Saeva O., Shevko A. Sulfur and nitrogen gases in the vapor streams from ore cyanidation wastes at a sharply continental climate, Western Siberia, Russia // Water Air Soil Pollut. 2019. Vol. 230. Art. 307
- 27 Руководство по эксплуатации "Комплекс универсальный ртутеметрический УКР-1МЦ" [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://gazoanalizators.ru/upload/iblock/ 942/cnydpcrncv95rebrnb0bmhxixs7u8f7d/ukr-1mc-re. pdf?ysclid=165uy7n5ad398676324 (дата обращения: 29.07.2022).
- 28 Пат. RU 2532365 C2, 2014.
- 29 Успенский А. Б., Федоров В. В. Вычислительные аспекты метода наименьших квадратов при анализе и планировании регрессионных экспериментов. М.: Изд-во МГУ, 1975. 168 с.
- 30 Розы ветров, Тисуль [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://lakka-sails.ru/winds/29557 (дата обращения: 18.05.2022).