

## К вопросу использования геохимических барьеров для предотвращения миграции паров ртути

А. Е. БОГУСЛАВСКИЙ, А. П. КРИВЕНКО

*Институт геологии и минералогии РАН  
630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3  
E-mail: boguslav@uiggm.nsc.ru*

### АННОТАЦИЯ

Рассмотрены вопросы миграции паров ртути через разные типы органоминеральных фильтров, определены поглощающие емкости сформированных геохимических барьеров. Выявлены наиболее перспективные типы геохимических барьеров для приповерхностных захоронений лесостепной ландшафтной зоны. Предложен подход для снижения испарения паров ртути путем перевода в более консервативную фазу метацианобаритмодификацию сульфида ртути (HgS).

**Ключевые слова:** газовая миграция ртути, сульфид ртути, метацианобарит, геохимические барьеры, ртутьсодержащие отходы.

Современная промышленность не способна обходиться без использования ртути. Она широко применяется в электротехнической промышленности и приборостроении, на хлорных производствах, как легирующая добавка, теплоноситель, катализатор при синтезе пластмасс, в лабораторной и медицинской практике, в сельском хозяйстве. Техногенный круговорот ртути в окружающей среде уже давно превышает природный, и, хотя в настоящее время существует тенденция снижения ее потребления, в обозримом будущем она продолжит играть важную роль. Ежегодная антропогенная эмиссия ртути составляет 9000–10 000 т/год, из них в атмосферу в виде паров и аэрозолей ежегодно поступает 3600–4500 т [1].

Ртуть – один из самых опасных загрязняющих окружающую среду металлов. По степени токсичности она относится к I классу опасности. ПДК валового содержания ртути

в почве составляет 2,1 мг/кг. Отходы с более высокими концентрациями необходимо захоранивать в специальных могильниках, которые гарантируют надежную консервацию элемента на протяжении длительного времени. Для предотвращения миграции ртути традиционно используются геохимические (сорбционный, сульфидный, восстановительный) и физические барьеры [2, 3]. В условиях захоронений необходимо учитывать два основных пути миграции ртути – с грунтовыми водами и в виде пара. Миграцию с водными растворами можно минимизировать, располагая хранилище вне зоны активного водообмена – над уровнем грунтовых вод, с перекрытием сверху для экранирования атмосферных осадков. Снизить интенсивность парообразования существенно сложнее. На практике для изоляции паров ртути используют разнообразные физические барьеры – битум, жидкое стекло, полимерные пленки и т. п. Цель данной работы – определение сорбционной емкости по отношению к парам ртути ряда местных природных сорбентов и

---

Богуславский Анатолий Евгеньевич  
Кривенко Александр Петрович

определение эффективности использования сульфидного барьера для предотвращения миграции паров ртути в условиях приповерхностных захоронений ртутьсодержащих отходов.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

**Характеристика материала, использованного для создания геохимических барьеров. Лессовидные суглинки.** Верхнечетвертичные лессовидные суглинки широко распространены на территории юга Западной Сибири. Они непрерывным чехлом (мощностью от нескольких до первых десятков метров) перекрывают более древние породы и служат почвообразующим субстратом для современных почв. В гранулометрическом составе преобладают фракции крупной пыли (0,01–0,05 мм) до 40–45 % и ила (< 0,001 мм) до 40 % во фракциях средней и мелкой пыли по 5–11 %. Минеральный состав: преобладают кварц, полевой шпат и мусковит. В подчиненных количествах содержатся гидрослюда и глинистые минералы. В илистой фракции гидрослюда и глинистые минералы выходят на первое место. Состав этих пород в пересчете на оксиды, %: SiO<sub>2</sub> – 64,42, TiO<sub>2</sub> – 0,75, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 12,36, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 4,75, MnO – 0,09, MgO – 2,08, CaO – 4,54, Na<sub>2</sub>O – 1,08, K<sub>2</sub>O – 1,94, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – 0,15, Ba – 0,04, потери при прокаливании (H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>) – 7,22.

**Марганцевые руды** Сунгайского месторождения (Салаирский кряж). Среднее содержание MnO в этих рудах 23,3 %. Mn представлен голландитом (BaMn<sub>8</sub>O<sub>16</sub>), криптомеланом (KMn<sub>8</sub>O<sub>16</sub>), пиролюзитом (MnO<sub>2</sub>) и литиофоритом ((Al, Li)MnO<sub>2</sub>(OH)<sub>2</sub>). В этих рудах также отмечаются гётит (FeOOH) и гидрогётит (FeO(OH)·nH<sub>2</sub>O) [4]. В образце, взятом для экспериментов, долевое содержание элементов следующее, %: Mn – 23, Fe – 1,86, K – 0,69, Cu – 0,43, Ni – 0,27, Ca – 0,21, Cr – 0,067, Zn – 0,032, Sr – 0,026, V – 0,018, Ti – 0,01, Pb, Y, Zr – 0,00n.

**Гумусированный горизонт почвы (гумус).** Гумусовый горизонт из разреза выщелоченного чернозема – одного из наиболее распространенных типов почв новосибирского Приобья. Интервал отбора 5–25 см, содержание гумуса в верхнем горизонте состав-

ляет 6–11 %, емкость обмена – 40–60 мг/экв на 100 г почвы. В составе обменных оснований доминирует кальций – до 90 % емкости обмена, магния – 10–20 %, и не более 1 % приходится на долю натрия и водорода. Реакция среды нейтральная, pH<sub>вод</sub> 6,5–7. Гранулометрический состав унаследован от почвообразующих суглинков. Преобладают фракции легкой пыли – 45 % и ила – до 20–25 % [5].

**Сера.** Мономинеральная элементарная сера, ромбическая модификация α – S, плотность 2,07 г/см<sup>3</sup>.

**Подготовка реакторов.** Для изучения миграции ртути через различные фильтры были подготовлены реакторы, представленные на рис. 1. Навеску ртутьсодержащих отходов помещали во внутреннюю емкость реактора, изготовленную из стекла. Сверху над ней в качестве фильтра насыпали слой материала. Внутренний сосуд лишен крышки, поэтому пары ртути, прошедшие сквозь слой фильтра, накапливались во внешней емкости реактора, изготовленной из металла, покрытого эмалью, объемом 12 л. Для определения содержания паров ртути во внешней емкости реакторы оснащались двумя патрубками: первый для отбора пробы воздуха и второй для компенсации давления. Патрубки затыкали резиновыми пробками, которые извлекали только при отборе пробы.

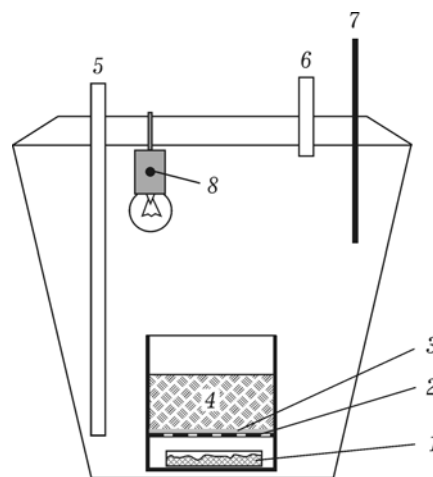


Рис. 1. Схема реактора для проведения эксперимента по определению проницаемости грунтов парами ртути: 1 – ртутьсодержащие отходы; 2 – сетка; 3 – бумажный фильтр; 4 – слой сорбента; 5 – патрубок для забора воздуха; 6 – патрубок для компенсации давления; 7 – термометр; 8 – лампа для нагрева реактора

В экспериментах, проходивших при повышенных температурах, во внутренний контур вводили электрическую лампочку мощностью 60 Вт, в результате чего температура в реакторе поднималась до 45–48 °С. Это на 20–25 °С выше, чем в контрольных реакторах (при комнатной температуре). Температура контролировалась термометром.

В первой серии экспериментов материал фильтра был высушен до воздушно-сухого состояния и измельчен до размера частиц 0,5 мм. Измельчение суглинков, гумуса и серы проводили в агатовой ступке. Для измельчения марганцевых руд применяли щековую дробилку и виброистиратель. Во второй серии экспериментов гумус и суглинки имели природную влажность, их утрамбовывали до плотности, в которой они находятся в естественных условиях.

Диаметр внутреннего сосуда, который заполнялся материалом фильтра, 10 см. Толщина слоя фильтра во всех опытах равна 7 см. Под слой фильтра помещали стеклянную емкость с измельченными ртутьсодержащими отходами с содержанием ртути ~ 0,2 %. Отходы представляли собой строительный мусор, в котором под биникуляром видны частицы металлической ртути. Масса навески отходов составляла 15–20 г. Основные формы содержания ртути в навеске отходов сорбированная и металлическая. В первом приближении можно считать, что во внутренней части реактора, где размещена навеска, ртуть испаряется до концентрации, близкой к концентрации насыщенного пара. Поэтому можно допустить, что концентрация ртути в газовой фазе до контакта с сорбентом составляет 1000–2500 мкг/м<sup>3</sup> (при 20–25 °С) [6]. При повышении температуры до 40–45 °С концентрация ртути в насыщенном паре составляет 8000–9500 мкг/м<sup>3</sup>.

Измерение концентрации ртути в газовой и твердой фазах и определение минерального состава проводили в Институте геологии и минералогии СО РАН.

*Определение ртути в грунтах* осуществлялось атомно-абсорбционным методом “холодного пара” на приборе MAS Model 50D фирмы BACHARACH (Англия). Определялась общая ртуть, для чего сначала производилось окисление всех форм ртути смесью серной и азотной кислот (1 : 1) в 5%-м рас-

творе перманганата калия, затем восстановление 10%-м хлоридом олова II в соляной кислоте. Предел обнаружения: 0,05 мкг/л в водном растворе и 0,01 мг/кг в грунтах.

*Определение паров ртути* проводили ртутным анализатором РА-915+ (атомно-абсорбционный спектрометр с Земановской коррекцией неселективного поглощения). Нижний предел обнаружения ртути в воздухе – 0–5, верхний – 2000 нг/м<sup>3</sup>. В режиме измерения “повышенные концентрации” с использованием одноходовой кюветы верхний предел поднимается до 220 000 нг/м<sup>3</sup>.

*Минеральный состав образцов* определяли методом рентгеновской порошковой дифрактометрии на дифрактометре ДРОН-3 (излучение CuK<sub>α</sub>). Ориентированные препараты приготовлены осаждением проб из водной суспензии на стеклянную подложку.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В задачи первой серии опытов входила оценка эффективности серы и смеси серы с суглинками именно как сорбционного барьера. Поэтому материал фильтра засыпали без утрамбовывания. Иначе действие геохимического барьера было бы наложено на физический барьер – слой слабопроницаемых суглинков. При такой постановке эксперимента миграция паров ртути осуществляется конвективно. Сорбция атомов ртути происходит на поверхности и в микротрещинах зерен.

Наилучшая очистка в этих опытах достигалась в реакторе с фильтром из марганцевых руд (табл. 1). На протяжении всего эксперимента концентрация паров ртути оставалась ниже фона в помещении (5–10 нг/м<sup>3</sup>). В реакторах, заполненных серой, суглинком и их смесью, концентрация паров во внешнем контуре постепенно нарастала. Быстрее всего увеличение происходило в реакторе, заполненном серой. Реакция  $S_{\text{тв}} + Hg_{\text{газ}} \leftrightarrow HgS_{\text{тв}}$  при этой температуре не протекает и ртуть осаждается, только адсорбируясь на частицах серы, не вступая в химическую реакцию. Однако на бумажном фильтре, который отделяет камеру с навеской от материала сорбента, после завершения эксперимента отмечены примазки черного цвета, состоявшие, по данным рентгенофазового анализа, из

Т а б л и ц а 1

Изменение концентрации ртути в газовой фазе во внешней части реактора при температуре 20–25 °С, мг/м<sup>3</sup>

Время выдержки, сут	Сорбент			
	Сера	Сера с суглинком (1/5)	Суглинок	Марганцевые руды
Исходное состояние	0–10	0–10	0–10	0–10
15	13 200	5270	750	0–2
32	169 800	76 200	19 500	0–5
47	>220 000	107 500	190 000	–
70	>220 000	145 000	>220 000	–

метациннабарита – высокотемпературной кубической модификации (структура типа сфалерита) сульфида ртути (температура перехода киновари в метациннабарит 345 °С). Причина кристаллизации метациннабарита, а не более низкотемпературной модификации сульфида ртути – киновари нами не установлена. Таким образом, реакция  $S_{\text{газ}} + Hg_{\text{газ}} \rightarrow HgS_{\text{тв}}$  протекает даже при комнатной температуре, хотя скорость ее протекания весьма незначительна. Суглинки также показали невысокую степень очистки. Уже в течение первых дней пары ртути в заметных концентрациях стали проникать сквозь сорбционный барьер. Это связано с их минеральным составом. Как отмечалось, они состоят преимущественно из кварца, полевого шпата и мусковита, а собственно глинистые минералы с высокой сорбционной емкостью находятся в подчиненных количествах. Смесь суглинков и серы в течение первого месяца демонстрировала промежуточные концентрации, а затем градиент увеличения концентрации снижался.

После окончания эксперимента в материале фильтра определяли содержание ртути

с интервалом опробования 1 см (табл. 2). Как и следовало из наблюдений за концентрацией паров, наименьшее содержание отмечено на мономинеральной сере – концентрации ртути не поднимались выше 8,31 мг/кг. Суглинки практически беспрепятственно пропускали ртуть при концентрации 20–30 мг/кг, а максимальная концентрация вблизи контакта составила 282 мг/кг. Смесь серы и суглинков дала некоторый промежуточный вариант. Наилучшие сорбционные характеристики показали марганцевые руды. По техническим причинам эксперимент с марганцевыми рудами прекращен на 34-е сутки. За это время пары прошли только на 2 см (см. табл. 2). Предельная концентрация ртути в марганцевых рудах для наших опытов составила 0,02 %, однако это далеко от предельного насыщения. Высокая сорбционная активность оксидов и гидроксидов железа и марганца широко применяется при связывании паров ртути. Другие фильтры (суглинки и их смесь) становятся проницаемыми для паров ртути задолго до максимального насыщения.

Для того чтобы ускорить реакцию, часть опытов продублирована при более высокой

Т а б л и ц а 2

## Распределение ртути в фильтрующем слое после завершения эксперимента при температуре 20–25 °С

Расстояние от навески ртути, см	Концентрация Hg, мг/кг			
	Сера	Сера с суглинком (1/5)	Суглинок	Марганцевые руды
1	7,16	36,5	282	195
2	6,46	35,7	180	8,50
3	6	23,1	41,5	0,51
4	1,90	12,7	36,9	0,66
5	8,31	8,5	47,3	0,65
6	1,33	6,7	30	0,66
7	5,31	11,3	22,6	0,70
Содержание до опыта	0,03	~ 0,07	0,08	0,67

Т а б л и ц а 3

Изменение концентрации паров ртути во внешней части реактора при температуре 40–45 °С, нг/м<sup>3</sup>

Время выдержки, сут	Сорбент		
	Сера	Сера с суглинком (1/5)	Суглинок
Исходное состояние	0–10	0–10	0–10
15	0–10	0–10	50–60
32	0–10	0–10	100–120
47	0–10	0–10	1050
70	0–10	0–10	1900

температуре (40–45 °С) (табл. 3). В условиях повышенных температур действие барьеров кардинально меняется: начинается интенсивное образование сульфида ртути в модификации метациннабарита. Он образуется как на частицах серы по реакции  $S_{\text{ТВ}} + \text{Hg}_{\text{газ}} \rightarrow \text{HgS}_{\text{ТВ}}$ , так и из газовых фаз по реакции  $S_{\text{газ}} + \text{Hg}_{\text{газ}} \rightarrow \text{HgS}_{\text{ТВ}}$  – примазки метацианобарита отмечаются на всей поверхности внутренней камеры реактора, в том числе и на самой навеске ртутьсодержащих отходов. На поверхности контакта происходит цементация частиц серы метациннабаритом. Несмотря на то что при увеличении температуры концентрация паров ртути во внутренней части реактора увеличивается почти на порядок, фильтры с серой хорошо справляются с очисткой. Концентрация паров во внешней части реактора не поднимается выше фоновых отметок. В реакторе, заполненном суглинком, концентрация ртути во внешней части реактора постепенно увеличивается, но концентрация паров на порядки ниже, чем во внешней части реактора, поставленного при комнатной температуре (см. табл. 1).

Как и в первой серии опытов, после завершения экспериментов материал фильтра послойно анализировали на содержание ртути (табл. 4). Максимальная концентрация ртути в реакторе с серой составила 314 мг/кг, что существенно ниже, чем в реакторах с фильтром из суглинков и смеси серы с суглинками. Высокие концентрации ртути отмечены в первых двух сантиметрах, что связано с цементацией метацианобаритом нижнего слоя серы и выступавшего как физический барьер, препятствующий дальнейшей миграции паров ртути. Максимальная концентрация ртути в фильтре из суглинков равна 4270 мг/кг – почти в 22 раза выше, чем в фильтре из реактора, работавшего при комнатной температуре.

В двух экспериментах геохимический барьер сочетался с физическим – слабой проницаемостью этих отложений в природных условиях. Суглинки и гумус с природной влажностью утрамбовывали до состояния естественной плотности, наблюдаемой в приповерхностных условиях. При этом конвективный перенос ртути сменился преимуществен-

Т а б л и ц а 4

## Распределение ртути в фильтрующем слое из реакторов после завершения эксперимента при температуре 45 °С

Расстояние от навески ртути, см	Концентрация Hg, мг/кг		
	Сера	Сера с суглинком (1/5)	Суглинок
1	314	1200	4270
2	1,96	10,10	727
3	0,52	6,10	69,20
4	0,62	1,15	11
5	0,51	1	4
6	0,48	0,39	2,40
7	0,74	0,44	–
Содержание до опыта	0,03	~ 0,07	0,08

Т а б л и ц а 5

**Распределение ртути в слое суглинков и гумуса, уплотненных до естественной плотности, мг/кг**

Расстояние от навески ртути, см	Лессовидные суглинки	Гумус
1	116	21
2	27,50	11
3	15	2,40
4	4,25	0,30
5	1,36	0,13
6	0,26	0,12
7	0,10	0,09
8	0,07	0,11
Содержание до опыта	0,08	0,10

но диффузионным. Длительность экспериментов составила 30 сут. Измерение концентрации паров ртути проводили каждые 7 дней. За это время концентрация паров во внешней части реактора находилась на фоновом уровне 0–10 нг/м<sup>3</sup>. В условиях естественного уплотнения пары ртути проникли в суглинках на 5 см, максимальное обогащение отмечено на границе слоя и достигло 116 мг/кг. В гумусе пары ртути проникли на 3 см (табл. 5).

Исходя из приведенных данных, можно сделать вывод, что при использовании в качестве барьера суглинков и почв более значительную роль играет физический барьер по сравнению с сорбционным. При этом сорбированная на глинистых и породообразующих минералах ртуть не является надежно связанной и в дальнейшем, как показано В. З. Фурсовым [7], способна эманировать.

Рассматривая профили распределения в суглинках, во всех случаях можно отметить резкое снижение концентрации от контакта к краевой части сорбента. Максимальное насыщение отмечается на контакте фильтра с

навеской. По мнению авторов, эта величина близка к максимальной емкости поглощения суглинков. Полученное при комнатной температуре распределение схоже с результатами, полученными для суглинков В. З. Фурсовым [7]. По сравнению с результатами, представленными Ю. В. Алехиным с соавторами [8], суглинки краснодубровской свиты в уплотненном состоянии показали более высокую сорбционную емкость по сравнению с суглинками из Байкальской рифтовой зоны (максимальные концентрации не превышали 45 мг/кг).

Для того чтобы оценить интенсивность образования сульфида ртути при более высоких температурах, проведены опыты (табл. 6) по следующей схеме: в герметичный контейнер объемом 50 мл засыпали навеску ртути-содержащих отходов, смешанную с серой в отношении 10:1. После этого контейнер помещали в сушильный шкаф и в течение 4–5 ч прогревали при разных температурах. Прогрев проводился при температурах 60, 80, 100 и 120 °С. Максимальная температура 120 °С, так как при этой температуре происходит плавление серы. Герметичность контейнеров проверяли измерением концентрации паров ртути во время прокаливании. Во всех случаях она не поднималась выше фона.

После прокаливании определяли интенсивность парообразования над обработанными пробами. При измерении необработанной навески ртути концентрация ее паров в приборе превысила максимально возможную величину. Поскольку в необработанных отходах присутствуют микрочастицы металлической ртути, концентрация паров может достигать ~1 000 000 нг/м<sup>3</sup> (концентрация насыщенных паров). В зависимости от температуры прогрева интенсивность испарения умень-

Т а б л и ц а 6

**Масса навесок ртутьсодержащих отходов и серы, а также продолжительность экспериментов по прокаливанию навесок отходов с серой**

Прогрев при температуре, °С	Масса, г		Время прокаливании, ч
	отходов	серы	
Необработанная проба	15,747	1,57	
60	14,415	1,44	3,45
80	21,264	2,13	5
100	15,120	1,51	4
120	13,019	1,30	5



Рис. 2. Концентрация паров ртути в реакторах, прогретых при разной температуре, и в необработанной навеске

шается от 6 до 500 раз (рис. 2). На стенках реакторов после прогрева отмечены примазки метацианобарита, однако попытки получить количественные оценки содержания сульфида серы в отходах методом рентгеновской порошковой дифрактометрии не принесли результата из-за ограничения по чувствительности данного метода.

Такая обработка может существенно снизить угрозу распространения паров ртути. Подбирая температуру, продолжительность прокаливания и соотношение отходов и самородной серы, можно найти оптимальный режим для нейтрализации разных типов ртутьсодержащих отходов. Увеличить степень переработки ртути в отходах и ускорить процесс образования сульфида можно, совместив прокаливание с механическим перемешиванием. Чтобы избежать попадания паров ртути в атмосферу, прогрев следует проводить в герметичных контейнерах, при этом вся испаряющаяся ртуть будет сразу связываться парами серы.

При использовании сорбентов в приповерхностных могильниках необходимо учитывать физико-химические условия, в которых геохимические барьеры должны функционировать. По данным метеостанции Бугры Новосибирской области, максимальное промерзание почвы при мощности снежного покрова в 40 см достигает 1,5 м. Температура на глубине 2–3 м от поверхности с декабря до конца июня 0–5 °C, а в летне-осенний период поднимается до 5–10 °C. Среднегодовая температура на этой глубине 4–5 °C. С увеличением глубины период сезонного прогрева будет уменьшаться и среднегодовая температура снизится еще на 1–2 °C [5].

В этих условиях сульфидный геохимический барьер образовываться не будет. Сорбционный барьер на основе лессовидных суглинков способен только замедлить поток паров ртути. Поэтому при консервации таких отходов необходимо введение в перекрывающий захоронение грунт дополнительных сорбентов. Уменьшить миграцию паров ртути сквозь суглинистые отложения можно и снижением их проницаемости. Общая пористость суглинистых отложений, по нашим данным, составляет в среднем 45–48 %. Механически снижая их пористость, можно существенно улучшить их защитные характеристики. При использовании местных суглинков и почв надежной консервации ртутьсодержащих отходов можно достичь только при комбинировании геохимических и физических барьеров и предварительной подготовке отходов для уменьшения парообразования.

## ВЫВОДЫ

В условиях почвенно-элювиальных профилей, в которых будут находиться захороненные ртутьсодержащие грунты и перекрывающие их отложения (4–5 °C), возможно развитие только сорбционного геохимического барьера. Сульфидный геохимический барьер при такой температуре не формируется. Интенсивное образование сульфида ртути начинается при достижении температуры 40 °C и выше.

Сорбция паров ртути уменьшается в следующем ряду: марганцевая руда > гумус > > лессовидные суглинки. Более низкая сорбционная емкость лессовидных суглинков объясняется минеральным составом, в котором преобладают кварц, полевой шпат и мусковит, а глинистые минералы находятся в подчиненных количествах. Сорбционная активность суглинков сильно зависит от температуры: при увеличении на 20 °C сорбционная емкость увеличивается в 15 раз. При использовании суглинков в качестве перекрывающих отложений более значимым параметром является низкая проницаемость этих отложений по сравнению с сорбционной емкостью. Для увеличения сорбционных характеристик грунтов можно добавлять материалы с высокой сорбционной емкостью, например измельченные в пудру марганцевые руды.

Снижать интенсивность испарения ртути в отходах можно, проводя предварительно прокаливание в присутствии самородной серы. При прокаливании в интервале температур 100–120 °С можно снизить парообразование до 500 раз. Чтобы избежать попадания паров ртути в атмосферу, прогрев следует проводить в герметичных контейнерах, при этом вся испаряющаяся ртуть будет сразу связываться в сульфид. Обработка отходов по данной технологии будет также снижать выход ртути под действием водных растворов (отрицательный десятичный логарифм произведения растворимости сульфида равен 52,7) при возможном попадании в захоронение воды.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ягольницер М. А., Соколов В. М., Рябцев А. Д. и др. Оценка промышленной эмиссии ртути в Сибири // *Химия в интересах устойчивого развития*. 1995. Т. 3, № 1-2. С. 23–35.
2. Сауков А. А., Айдиньян Н. Х., Озерова Н. А. *Очерки геохимии ртути*. М., 1972. 335 с.
3. Фурсов В. З. Газортутный метод поисков месторождений полезных ископаемых. М., 1983. 205 с.
4. Быч А. И., Батырев А. И. Марганцевые месторождения Кемеровской области // *Руды и металлы*. 1998. № 2. С. 22–28.
5. *Агрофизическая характеристика почв Западной Сибири* / под ред В. П. Панфилова. Новосибирск, 1976. 544 с.
6. Некрасов Б. В. *Основы общей химии*. Т. 2. М., 1973. 688 с.
7. Фурсов В. З. Выявление и оценка наложенных геохимических аномалий ртути на закрытых территориях при МГХК-200. Методические рекомендации. М., 2001. 155 с.
8. Новые результаты исследования диффузионной и фильтрационной миграции подвижных форм ртути / Ю. В. Алехин, Н. В. Ковальская, С. А. Лапицкий и др. // Сайт все о геологии: <http://geo.com.ru/db/msg.html?mid=1169917&uri=index.html>

1. Ягольницер М. А., Соколов В. М., Рябцев А. Д. и др. Оценка промышленной эмиссии ртути в Сибири //

## About the Use of Geochemical Barriers to Prevent the Migration of Mercury Vapor

A. E. BOGUSLAVSKY, A. P. KRIVENKO

*Institute of Geology and Mineralogy SB RAS  
630090, Novosibirsk, Acad. Koptyug ave., 3  
E-mail: boguslav@uiggm.nsc.ru*

Problems concerning the migration of mercury vapor through different types of organomineral filters are considered, the absorbing capacities of the formed geochemical barriers are determined. The most promising types of geochemical barriers for the subsurface burial in the forest-steppe landscape zone are revealed. An approach to a decrease in mercury vapor evaporation by transforming into a more conservative phase of metacyanobarite modification of mercury sulfide (HgS) is proposed.

**Key words:** gas migration of mercury, mercury sulfide, metacyanobarite, geochemical barriers, mercury-containing waste.