

УДК 502.3

Ртуть в атмосферном воздухе и осадках в 2022–2023 гг. на станции мониторинга Листвянка (Южное Прибайкалье)

Е.С. Луцкин[✉], М.Ю. Шиховцев, Е.В. Моложникова, В.А. Оболкин,
О.И. Бердашкинова, Т.В. Ходжер*

*Лимнологический институт СО РАН
664033, г. Иркутск, Улан-Баторская, 3*

Поступила в редакцию 01.02.2024;
после доработки 18.04.2024;
принята к печати 19.04.2024

Газообразная элементарная ртуть (GEM) является преобладающей формой ртути в атмосфере. В результате осаждения она поступает в наземные и водные экосистемы, где в дальнейшем преобразуется в экотоксикант — метилртуть. Работа посвящена изучению GEM в атмосферном воздухе и общей ртути в атмосферных осадках в Южном Прибайкалье. Отбор проб проводился на станции мониторинга Листвянка (51,9° с.ш., 104,4° в.д.) в 2022–2023 гг. Концентрация ртути в воздухе измерялась газоанализатором РА-915АМ (Санкт-Петербург, Россия). Концентрация общей ртути в атмосферных осадках определялась по методике ПНД Ф 14.1:2.4.271-2012, метод А (перманганатная минерализация). За период исследования концентрация GEM в атмосферном воздухе составила в среднем 1,61 нг/м³; коэффициент парной корреляции между Hg⁰ и SO₂ — 0,47; между Hg⁰ и NO₂ — 0,44; в 12 случаях отмечена сильная положительная корреляция (коэффициент > 0,9) между Hg⁰, SO₂ и NO₂. Средневзвешенное содержание общей ртути в атмосферных осадках составило 44 нг/л, медиана — 29 нг/л, максимальное значение — 282 нг/л. Для каждого эпизода повышения концентрации ртути свыше 2,0 нг/м³ рассчитаны обратные траектории движения воздушных масс с помощью модели HYSPLIT. Траекторный анализ также подтвердил наше предположение об едином типе источника ртути и малых газовых примесей. Дополнены существующие представления о содержании ртути в атмосфере Южного Прибайкалья. Установлено, что несмотря на значительное удаление от крупных городов, содержание ртути в атмосферных осадках на побережье оз. Байкал сопоставимо с результатами, полученными в городских агломерациях Непала, Канады, Кореи, Китая.

Ключевые слова: элементарная газообразная ртуть, общая ртуть, атмосферные осадки, атмосферный воздух, HYSPLIT, Южное Прибайкалье; gaseous elemental mercury, total mercury, precipitation, atmospheric air, HYSPLIT, Southern Baikal Region.

Введение

Исследование ртути в различных природных средах является одной из актуальных научных задач современного мира. Особый интерес представляет изучение ртути, поступившей в атмосферу вместе с выбросами от антропогенных источников, поскольку она переносится на большие расстояния от источника [1–3], обладает высокой токсичностью и способностью накапливаться в живых организмах [4, 5]. Несмотря на то, что существует множество форм атмосферной ртути, в основном выделяют три ее

«фракции»: газообразная элементарная (Hg⁰); газообразная окисленная (Hg²⁺ и реже Hg⁺) и ртуть, связанная с твердыми частицами (Hg_p) [6–8]. Согласно проведенным оценкам наиболее распространенной формой является газообразная элементарная ртуть (GEM), на долю которой приходится от 90 до 98% ее общего содержания, при этом время жизни GEM в атмосфере оценивается различными учеными от нескольких месяцев до двух лет [9–11].

Принимая во внимание серьезные последствия ртутного загрязнения для окружающей среды и здоровья человека, в 2010 г. начались международные мониторинговые исследования в рамках проекта GMOS (<https://www.gmos.eu>). Сеть GMOS состоит из 35 станций, расположенных по всему миру. В России на данный момент существует всего одна станция, расположенная на западном побережье Южного Байкала в пос. Листвянка [12].

* Евгений Сергеевич Луцкин (Lutskin2000@mail.ru); Максим Юрьевич Шиховцев (Max97irk@yandex.ru); Елена Владимировна Моложникова (yelka75@yandex.ru); Владимир Аркадьевич Оболкин (obolkin@lin.irk.ru); Ольга Иннокентьевна Бердашкинова (khuriganowa@mail.ru); Тамара Викторовна Ходжер (khodzher@lin.irk.ru).

В атмосферу ртуть поступает как от природных, так и от антропогенных источников. К природным относят лесные пожары, вулканическую и геотермальную деятельность [13, 14]. Антропогенные источники ртути включают в себя объекты теплоэнергетики, пыление в результате открытой добычи полезных ископаемых, особенно кустарные методы золотодобывающей промышленности, предприятия цветной и черной металлургии, а также прямое производство ртути [15–19].

По объему выбросов загрязняющих веществ в атмосферу Иркутская область занимает третье место в Сибирском федеральном округе. В 2022 г. объем выбросов составил 739 тыс. т. Для сравнения суммарный выброс в год от стационарных источников Красноярского края равен 827 тыс. т (исключая г. Норильск), Республики Бурятия – 107 тыс. т, Республики Саха (Якутия) 338 тыс. т. Данные об объеме выбросов от источников были взяты из специализированного статистического отчета «Сведения об охране атмосферного воздуха» 2-ТП (воздух) (<https://rpn.gov.ru/open-service/analytic-data/statistic-reports/air-protect>).

Ведущую роль в структуре промышленности Иркутской области играют предприятия топливно-энергетического комплекса, выбросы которых составляют около 60% в регионе [20] и образуются в результате сжигания органического топлива, в основном угля (главный антропогенный источник поступления ртути в атмосферу). До сих пор не решена проблема утилизации ртутных отходов на территории комбината «Усольехимпром» (г. Усолье-Сибирское). Несмотря на его закрытие в 2012 г., он остается одним из главных резервуаров техногенной ртути в регионе. Поэтому проблема ртутного загрязнения в Иркутской области стоит достаточно остро. Большинство публикаций по этой проблеме направлено на исследование содержания ртути в снежном покрове, воде, почве и живых организмах в регионе [21–27]. Работ, посвященных изучению ртути в атмосферном воздухе и атмосферных осадках, мало для формирования полной картины пространственного и временного ее распределения как вблизи источников, так и на удаленных от них территориях. В Лимнологическом институте СО РАН с 2011 г. ведется непрерывный мониторинг ртути в атмосфере на ст. Листвянка [28, 29], которая входит в программу GMOS.

Цель работы – определение концентрации GEM в атмосферном воздухе и общей ртути в атмосферных осадках на станции мониторинга Листвянка, расположенной в Центральной экологической зоне (ЦЭЗ) Южного Байкала. В статье представлены результаты измерений, полученные в 2022–2023 гг., проанализированы суточная и сезонная изменчивость ртути и выявлена связь с другими газовыми примесями.

Материалы и методы

В работе рассматриваются данные (сентябрь 2022 г. – декабрь 2023 г.) о концентрации газообразной элементарной ртути в атмосферном воздухе

и содержании общей ртути в атмосферных осадках на ст. Листвянка (далее по тексту – ртуть). Для подтверждения влияния единой группы антропогенных источников на ЦЭЗ Южного Байкала также используются данные о содержании диоксида серы (SO₂) и диоксидов азота (NO₂) в атмосферном воздухе за аналогичный период исследования.

Станция Листвянка расположена на западном побережье Южного Байкала (51,84° с.ш., 104,89° в.д.) в 60 км от г. Иркутска и в 1 км от п. Листвянка. Расположение станции на вершине прибрежного холма (на высоте 205 м от уреза воды) позволяет уменьшить влияние локальных источников загрязнения атмосферы, расположенных в поселке, и отслеживать влияние региональных источников загрязнения атмосферы [30]. Согласно результатам модельных расчетов (Weather Research and Forecasting) пункт измерений находится под воздействием мезомасштабных вихревых структур с линейными размерами 10–20 км, что, в частности, определяет особенности циркуляции атмосферы над станцией [31].

Измерительный комплекс включает в себя газоанализатор контроля ртути РА-915АМ (ЛЮМЭКС, Санкт-Петербург, Россия) и автоматизированные хемилюминесцентные газоанализаторы С-310А (SO₂), Р-105 (NO_x) (ОПТЭК, Санкт-Петербург, Россия). Концентрации диоксида серы и оксидов азота регистрировались с разрешением 0,001 мг/м³ с приведенной погрешностью ±25% в диапазоне от 0 до 0,05 мг/м³ и относительной погрешностью ±25% в диапазоне от 0,05 до 2,0 мг/м³. Содержание газообразной элементарной ртути измерялось в диапазоне от 0,5 до 20000 нг/м³ с погрешностью ±20% с временным разрешением 5 мин.

Атмосферные осадки отбирались автоматическим осадкосборником US-320 (Япония) с воронкой диаметром 300 мм. Пробы отбирались преимущественно один раз в сутки, в случае длительных осадков – по окончании выпадений. Концентрацию общей ртути в них определяли по методике ПНД Ф 14.1:2.4.271-2012, метод А (перманганатная минерализация) [32] в аккредитованной лаборатории гидрохимии и химии атмосферы.

Для исследования термической стратификации атмосферы до высоты 1000 м с вертикальным разрешением от 25 до 50 м на ст. Листвянка использован метеорологический температурный профилемер МТР-5 (ЦАО, Москва, Россия). В перспективе данные вертикального профилирования могут быть положены в основу уточненных схем параметризации характеристик оптической турбулентности над станцией мониторинга [33, 34].

С целью подтверждения воздействия удаленных групп источников на состояние воздушного бассейна над юго-западным побережьем оз. Байкал была применена траекторная модель HYSPLIT [35]. Расчеты проведены на основе архивных метеорологических данных GDAS с сеткой значений 1 × 1° на момент выпадения осадков и ситуаций аномального повышения концентраций общей ртути (> 3σ).

Продолжительность обратных траекторий варьировалась в пределах от 24 до 72 ч. Расчеты проводились в диапазоне от 250 до 800 м над уровнем земли (AGL). Первый уровень (250 м над землей) был выбран как характерный для поверхностного слоя атмосферы, второй и третий — 500 и 800 м соответственно, были определены как свойственные для переноса дымовых шлейфов ТЭЦ и атмосферных осадков. Это подтверждается лидарными исследованиями как на стационарных постах наблюдения, расположенных на побережье озера [36], так и в ходе корабельных экспедиций [37, 38].

Результаты и обсуждение

Содержание ртути в атмосферном воздухе на ст. Листвянка

Концентрация GEM в атмосфере в районе ст. Листвянка изменялась от 1,13 до 2,85 нг/м³ (рис. 1) при среднем значении 1,61 нг/м³. Диапазон изменений содержания GEM в атмосферном воздухе согласуется с вариациями за 2011–2020 гг. и соответствующим средним значением этого периода (1,59 нг/м³), представленными в работе [28]. Наибольшие концентрации были зафиксированы в зимние месяцы: декабрь (1,83 нг/м³), январь (1,75 нг/м³) и февраль (2,03 нг/м³), наименьшие — в июле, августе и сентябре (1,34; 1,34 и 1,41 нг/м³ соответственно). Это хорошо согласуется с общей картиной загрязнения атмосферы Южного Прибайкалья как ртутью [29], так и другими поллютантами антропогенного происхождения [39].

Для понимания характера распределения концентрации GEM на ст. Листвянка была построена

гистограмма (рис. 2), из которой видно, что в 76% измерений концентрация ртути варьирует в диапазоне от 1,2 до 2,0 нг/м³. Значения, выходящие за порог 2,0 нг/м³, считаем повышенными.

Анализ показал, что коэффициент парной корреляции между концентрациями Hg⁰ и SO₂ за весь период исследования составил 0,47, между Hg⁰ и NO₂ — 0,44. Всего было зарегистрировано 160 эпизодов превышения концентрацией ртути значения 2 нг/м³, что составляет 10% от всех измерений, хотя в большинстве они имели краткосрочный характер.

Для более подробного анализа были рассмотрены эпизоды длительностью более двух часов (всего 76 эпизодов). Данный временной отрезок исключает возможные погрешности в измерениях. В каждом эпизоде рассмотрен суточный ход концентраций GEM, диоксидов серы и азота, рассчитаны коэффициенты парной корреляции, проведен траекторный анализ и оценены вертикальные температурные профили на станции и вблизи источника. В 42 случаях отмечена положительная корреляция между концентрацией малых газовых примесей и ртути с коэффициентом более 0,5 (в 12 из них коэффициент корреляции составил более 0,9).

Изменчивость концентраций антропогенных примесей над этой территорией высокая и сильно зависит от метеоусловий. Прежде всего, на нее влияют направление и скорость ветра, а также стратификация пограничного слоя атмосферы, определяющая рассеивающую способность. С помощью пакета Oreanig для языка R были рассчитаны диаграммы повторяемости направления ветра в зависимости от его скорости и концентрации GEM (рис. 3). Анализ рис. 3 показывает взаимосвязь

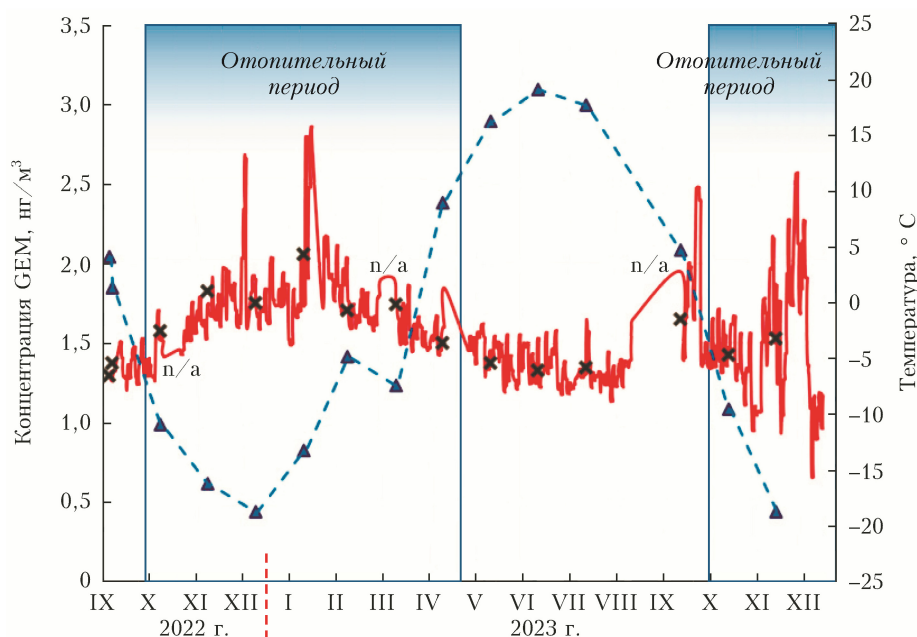


Рис. 1. Изменчивость среднесуточной концентрации GEM на ст. Листвянка в 2022–2023 гг. (красная кривая) и температуры воздуха в г. Иркутске (синяя кривая), крестиком и треугольником обозначены среднемесячные значения, n/a — данные недоступны (см. цветные рис. 1–6 на сайте <http://iao.ru/ru/content/vol.37-2024/iss.06>)

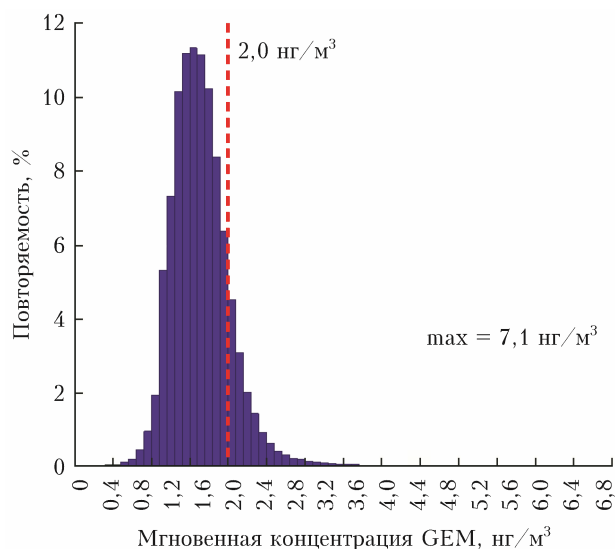


Рис. 2. Гистограмма распределения мгновенных концентраций ртути в атмосферном воздухе на ст. Листвянка

между скоростью, направлением ветра и содержанием примеси в атмосфере. Повышенные концентрации ртути регистрируются при ветре северо-западного сектора (СЗ, СЗЗ) со скоростями свыше 3 м/с. При малых скоростях ветрах (0–2 м/с) северо-западного и юго-восточного секторов концентрации GEM изменяются в пределах от 0,8 до 1,4 нг/м³.

Далее рассмотрим несколько характерных случаев повышения концентраций общей ртути и других малых газовых примесей в атмосфере на ст. Листвянка (рис. 4). Так, с 08.12.2023 г. на юге Иркутской области установился антициклонный тип погоды, характеризующийся слабыми ветровыми потоками, отсутствием атмосферных осадков и температурой воздуха на 11–17 °С ниже климатической нормы. Подобные условия привели к увеличению объема выбросов загрязняющих веществ объектами теплоэнергетики и ухудшению условий рассеивания примесей в атмосфере.

По данным радиозондирования на ст. Ангарск (52,4860° с.ш., 103,8299° в.д.) на рис. 4, в–д

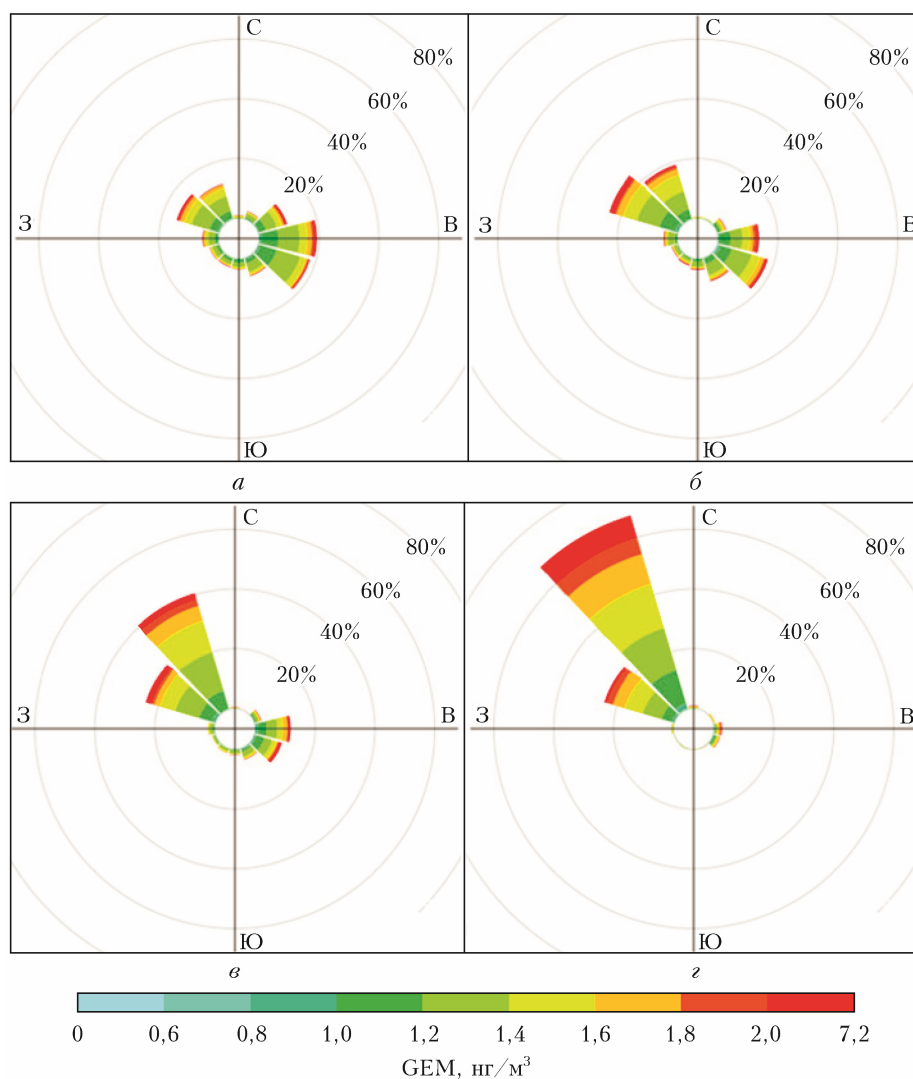


Рис. 3. Роза загрязнения газообразной элементарной ртутью в зависимости от направления и скорости ветра на ст. Листвянка в 2022–2023 гг.: 0–1 (а); 1–2 (б); 2–3 (в); > 3 м/с (г)

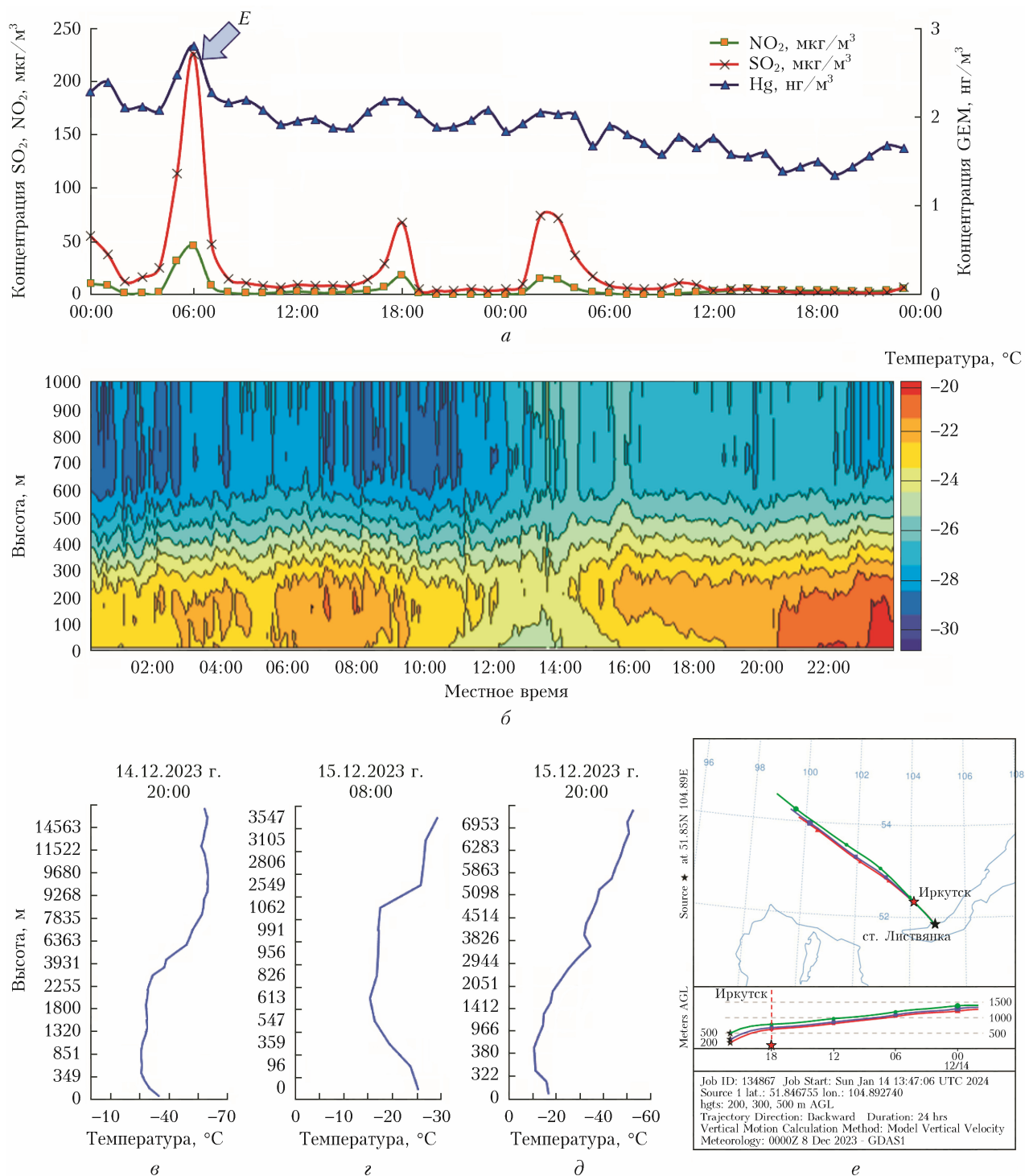


Рис. 4. Суточный ход концентрации газообразной элементарной ртути, диоксида серы и диоксида азота 15–16.12.2023 г. на ст. Листвянка (а); вертикальное распределение температуры на ст. Листвянка (профилимер МТП-5) 15.12.2023 г. (б); ст. Ангарск 14 и 15.12.2023 г. (в–д) (<https://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>); обратные траектории движения воздушных масс на высотах 200, 300 и 500 м над уровнем земли в 06:00 15.12.2023 г. (е)

построены вертикальные профили изменчивости температуры воздуха. Согласно измерениям 14.12 и 15.12.2023 г. над городом сформировалась устойчивая инверсия на высотах от 0 до 300–600 м с перепадом температуры (dT) от 5 до 10 $^{\circ}\text{C}$. По результатам расчетов обратных траекторий движения воз-

душных масс (рис. 4, е) 15.12 в 06:00 (здесь и далее указано местное время) атмосфера над ст. Листвянка оказалась под влиянием выбросов от антропогенных источников Иркутской агломерации (рис. 4, а). Установлено, что антропогенные выбросы достигли юго-западного побережья оз. Байкал за 4 ч. Из рис. 4, а

видно, что одновременно с высокой концентрацией GEM ($2,8 \text{ нг/м}^3$) на станции отмечено повышение концентраций диоксида серы (226 мкг/м^3) и диоксида азота (46 мкг/м^3). В это же время на ст. Листвянка была зафиксирована температурная инверсия, которая способствовала ухудшению рассеивания примесей (рис. 4, б).

Ртуть в атмосферных осадках на ст. Листвянка

Одним из основных способов выведения ртути из атмосферы является влажное осаждение. Поэтому для оценки локального и регионального загрязнения ртутью атмосферных осадков, а также количественных характеристик влажного осаждения с мая 2022 г. по апрель 2023 г. на ст. Листвянка были впервые отобраны и проанализированы 48 проб атмосферных осадков. Статистический анализ полученных данных показал, что средняя концентрация общей ртути составила 51 нг/л (рис. 5). С учетом единичных эпизодов высоких концентраций общей ртути и их влияния на среднее значение в атмосферных осадках дополнительно рассчитана медиана — 29 нг/л (рис. 5). Также для репрезентативной оценки уровня загрязнения ртути в различные сезоны года целесообразно использовать ее средневзвешенные концентрации в атмосферных осадках для единичных событий с учетом вклада каждого события в водном эквиваленте [40, 41], величина которого составила 44 нг/л .

Анализ всего ряда наблюдений (48 проб) показывает, что в 13 пробах осадков содержание ртути

превышало среднее значение ($C > 51 \text{ нг/л}$), в 10 пробах концентрация общей ртути была ниже предела обнаружения методики ($C < 10 \text{ нг/л}$). Максимальное значение общей ртути зафиксировано в снеге, выпавшем 11.02.2023 г., — 282 нг/л .

Анализ литературных данных позволил сделать следующее заключение: медианное содержание ртути в атмосферных осадках на ст. Листвянка выше, чем на фоновых и сельских территориях в других районах мира ($5,5\text{--}15 \text{ нг/л}$), и соизмеримо с результатами, полученными в городских агломерациях Непала, Канады, Кореи, Китая ($14\text{--}36 \text{ нг/л}$), а также в рядом расположенных сибирских городах ($10\text{--}14 \text{ нг/л}$) [40–42].

Для каждого дня с осадками с помощью модели HYSPLIT рассчитаны обратные траектории переноса воздушных масс. Анализ показал, что в 80% случаев атмосферные осадки на ст. Листвянка приносили северо-западные воздушные массы; осадки, в которых концентрация ртути превышала 51 нг/л , были принесены воздушными массами, прошедшими над Иркутской промышленной зоной.

Для оценки влияния атмосферных осадков на содержание ртути в атмосфере был проведен анализ данных о концентрации общей ртути в атмосферных выпадениях и результатов непрерывного мониторинга GEM. В результате было выделено два типа ситуаций. Наиболее часто (73%) встречается ситуация первого типа с понижением концентрации GEM во время выпадения осадков. В 27% (второй тип ситуации) концентрация ртути в атмосферном воздухе возрастала с началом выпадения осадков (рис. 6).

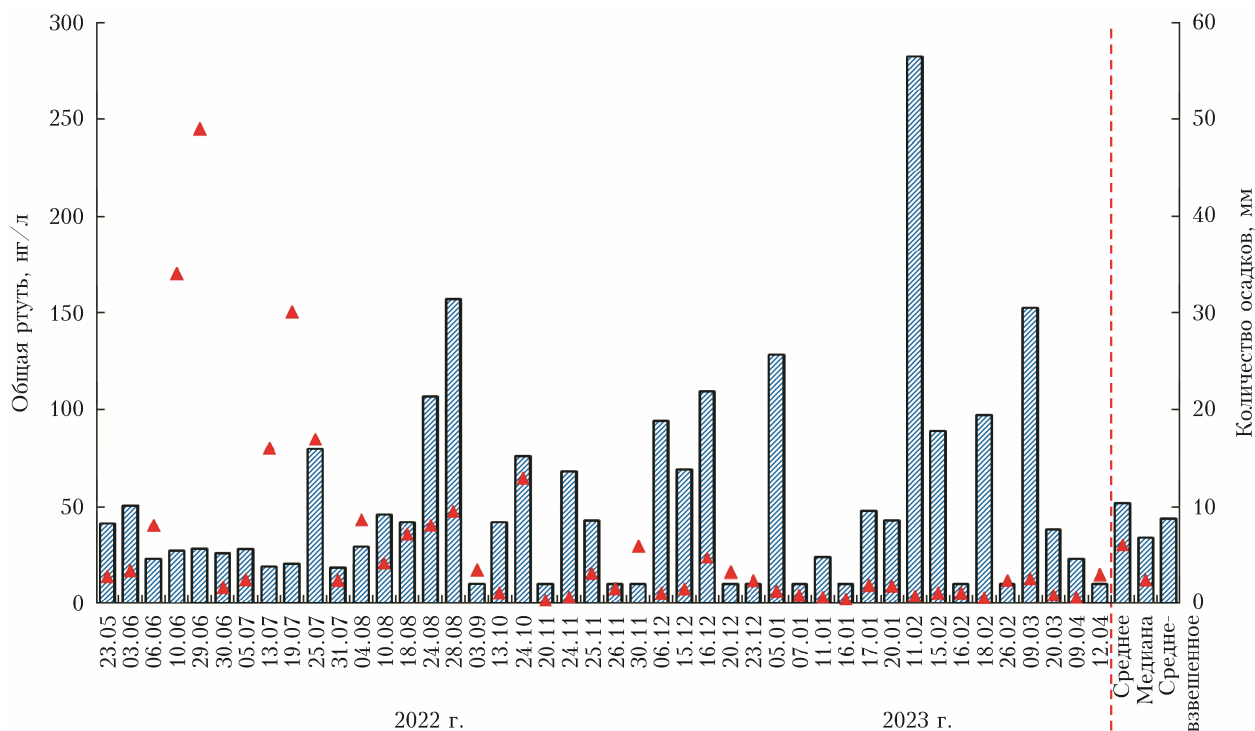


Рис. 5. Содержание общей ртути в осадках и количество атмосферных осадков (треугольники), выпавших на ст. Листвянка в 2022–2023 гг.

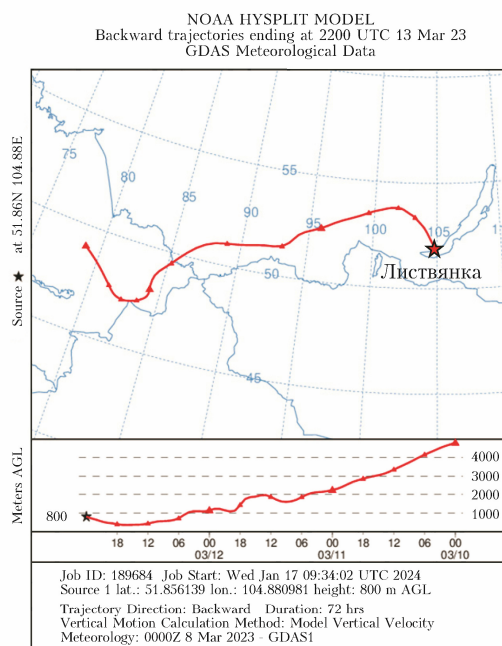
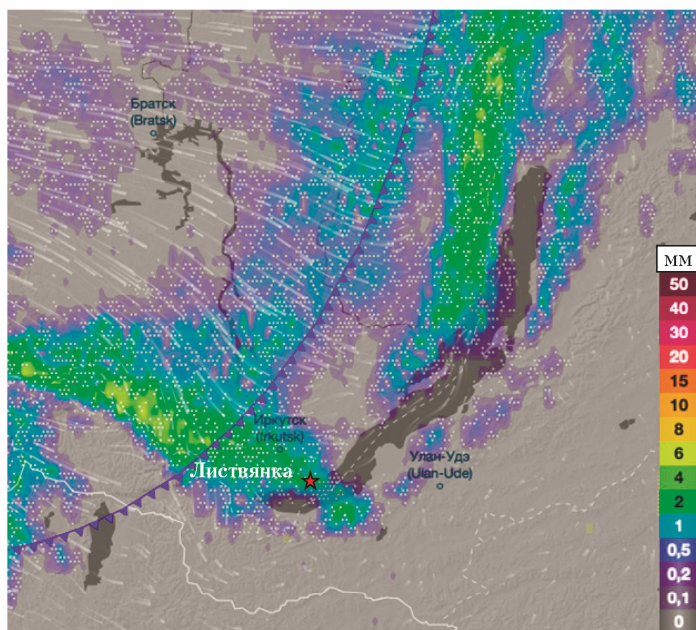
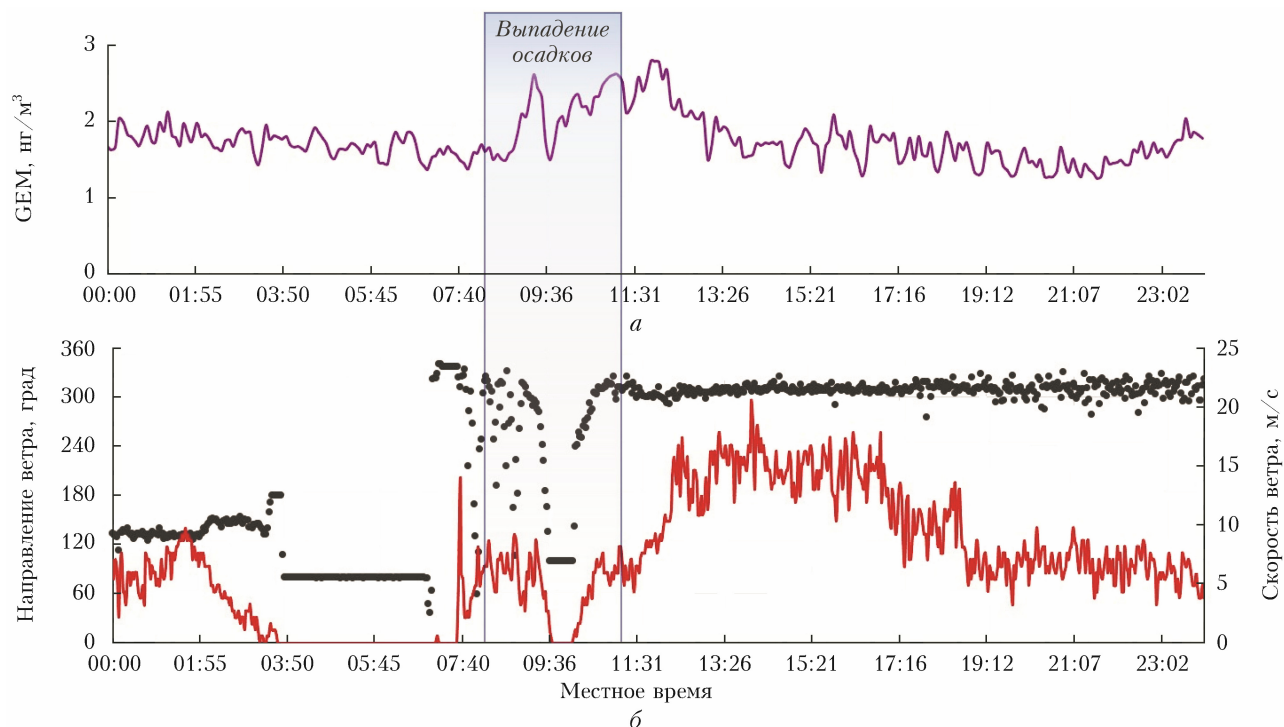


Рис. 6. Изменчивость GEM в атмосфере на ст. Листвянка 13.03.2023 г. (а); скорость и направление ветра в районе ст. Листвянка 13.03.2023 г. (б); карта осадков в 08:00 13.03.2023 г. (<https://www.ventusky.com>) (в); обратная траектория движения воздушных масс на высоте 800 м над уровнем земли в 08:00 13.03.2023 г. (цв. рисунки см. на сайте <https://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT.php>) (г)

Проведенный анализ метеорологических условий для ситуаций второго типа показал, что непосредственно перед выпадением осадков происходит смена фронта. Если до выпадения осадков в атмосфере над станцией отмечен штиль либо слабые юго-восточные потоки, то в момент выпадения осадков ветер усиливается и изменяет направление на северо-западное, в исследуемый район приходят воз-

душные массы, сформировавшиеся над промышленными центрами Восточной Сибири (рис. 6).

Заклучение

В 2022–2023 гг. в режиме непрерывного мониторинга продолжены исследования газообразной элементарной ртути в атмосферном воздухе

на ст. Листвянка. Статистический анализ данных показал, что средняя концентрация газообразной элементарной ртути в атмосферном воздухе составляет 1,61 нг/м³. Повышенные концентрации ртути в атмосферном воздухе, больше 2 нг/м³, фиксировались в 160 случаях.

На основании изменения концентраций газообразной элементарной ртути, диоксида серы и азота в атмосферном воздухе, коэффициентов их парной корреляции, траекторного анализа, вертикальных температурных профилей вблизи источника и на ст. Листвянка сделан вывод о единой группе источников — угольных ТЭЦ, загрязняющие примеси от которых при определенных метеорологических и синоптических ситуациях попадают в ЦЭЗ Южного Байкала. Из 76 рассмотренных эпизодов повышенного содержания ртути в атмосферном воздухе, длившихся более 2 ч, отмечено 42 эпизода с сильной положительной корреляцией по анализируемому газу (в 12 случаях коэффициент был более 0,9).

На ст. Листвянка впервые проанализировано содержание общей ртути в атмосферных осадках. Установлены концентрации ртути: средневзвешенная — 44 нг/л, медианная — 29 нг/л. В 10 пробах осадков концентрации были ниже предела обнаружения методики ($C < 10$ нг/л). Медианное содержание ртути в атмосферных осадках на ст. Листвянка сопоставимо с результатами, полученными в городских агломерациях Непала, Канады, Кореи, Китая.

Результаты анализа данных о концентрации общей ртути в атмосферных осадках и результатов непрерывного мониторинга GEM позволили разделить все ситуации на две группы. В большинстве случаев в момент выпадения осадков происходило понижение концентрации GEM в атмосферном воздухе, что согласуется с современным научным пониманием влажного осаждения ртути из атмосферы, однако в остальных зарегистрированных случаях концентрация GEM повышалась. Данная ситуация возникала преимущественно с октября по март при смене фронта. Во всех рассмотренных эпизодах происходили усиление ветра свыше 3 м/с и изменение направления на северо-западное.

Благодарности. Авторы выражают признательность сотрудникам лабораторий гидрохимии и химии ЛИИ СО РАН за проведение химического анализа, а также лаборатории гидрологии и гидрофизики ЛИИ СО РАН за предоставленные метеоданные.

Финансирование. Работа выполнена в рамках госзадания ЛИИ СО РАН № 0279-2021-0014 «Исследование роли атмосферных выпадений на водные и наземные экосистемы бассейна озера Байкал, идентификация источников загрязнения атмосферы».

Список литературы

1. Yu B., Yang L., Liu H., Xiao C., Bu D., Zhang Q., Fu J., Zhang Q., Cong Z., Liang Y., Hu L., Yin Y., Shi J., Jiang G. Tracing the transboundary transport of mercury to the Tibetan Plateau using atmospheric mer-

- cury isotopes // Environ. Sci. Technol. 2022. V. 56, N 3. P. 1568–1577. DOI: 10.1021/acs.est.1c05816.
2. Emeq. Heavy Metals: Analysis of long-term trends, country-specific research and progress in mercury regional and global modelling / Meteorological Synthesizing Centre — East; Chemical Co-ordinating Centre. Report 2. 2015. URL: <http://www.msceast.org/index.php/reports>.
3. Qin X., Dong X., Tao Z., Wei R., Zhang H., Guo Q. Tracing the transboundary transport of atmospheric particulate bound mercury driven by the East Asian monsoon // J. Hazard. Mater. 2023. V. 446. P. 130678. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2022.130678.
4. Langford N.J., Ferner R.E. Toxicity of mercury // J. Hum. Hypertens. 1999. V. 13, N 10. P. 651–656. DOI: 10.1038/sj.jhh.1000896.
5. Pavithra K.G., SundarRajan P., Kumar P.S., Rangasamy G. Mercury sources, contaminations, mercury cycle, detection and treatment techniques: A review // Chemosphere. 2023. V. 312. P. 137314. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.137314.
6. Brooks S., Arimoto R., Lindberg S., Southworth G. Antarctic polar plateau snow surface conversion of deposited oxidized mercury to gaseous elemental mercury with fractional long-term burial // Atmos. Environ. 2008. V. 42, N 12. P. 2877–2884. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.137314.
7. Lindqvist O., Rodhe H. Atmospheric mercury — a review // Tellus B. 1985. V. 37, N 3. P. 136–159. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2007.05.029.
8. Ye Z., Mao H., Lin C.J., Kim S.Y. Investigation of processes controlling summertime gaseous elemental mercury oxidation at midlatitudinal marine, coastal, and inland sites // Atmos. Chem. Phys. 2016. V. 16, N 13. P. 8461–8478. DOI: 10.5194/acp-16-8461-2016.
9. Horowitz H.M., Jacob D.J., Zhang Y., Dibble T.S., Slemr F., Amos H.M., Schmidt J.A., Corbitt E.Y., Marais E.A., Sunderland E.M. A new mechanism for atmospheric mercury redox chemistry: Implications for the global mercury budget // Atmos. Chem. Phys. 2017. V. 17, N 10. P. 6353–6371. DOI: 10.5194/acp-17-6353-2017.
10. Zhang Y.X., Jacob D.J., Horowitz H.M., Chen L., Amos H.M., Krabbenhoft D.P., Slemr F., St Louis V.L., Sunderland E.M. Observed decrease in atmospheric mercury explained by global decline in anthropogenic emissions // Proc. Nat. Acad. Sci. 2016. V. 113, N 3. P. 526–531. DOI: 10.1073/pnas.1516312111.
11. Lamborg C., Fitzgerald W., O'Donnell J., Torgersen T. A non-steady state box model of global-scale mercury biogeochemistry with interhemispheric atmospheric gradients // Abstr. Papers Am. Chem. Soc. 2002. V. 223. P. U520–U520.
12. Sprovieri F., Pirrone N., Bencardino M., D'amore F., Carbone F., Cinnirella S., Mannarino V., Landis M., Ebinghaus R., Weigelt A., Brunke E.-G., Labuschagne C., Martin L., Munthe J., Wangberg I., Artaxo P., Morais F., Barbosa H.M.J., Brito J., Warren C., Barbante C., Dieguez M.C., Garcia P.E., Dommergue A., Angot H., Magand O., Skov H., Horvat M., Kotnik J., Read K.A., Neves L.M., Gawlik B.M., Sena F., Mashyanov N., Obolkin V., Wip D., Feng X.B., Zhang H., Fu X., Ramachandran R., Cossa D., Knoery J., Maruscak N., Nerentorp M., Norstrom C. Atmospheric mercury concentrations observed at ground-based monitoring sites globally distributed in the framework of the GMOS network // Atmos. Chem. Phys. 2016. V. 16, N 18. P. 11915–11935. DOI: 10.5194/acp-16-11915-2016.

13. Gustin M.S., Lindberg S.E., Weisberg P.J. An update on the natural sources and sinks of atmospheric mercury // *Appl. Geochem.* 2008. V. 23, N 3. P. 482–493. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2007.12.010.
14. Pirrone N., Cinnirella S., Feng X., Finkelman R.B., Friedli H.R., Leaner J., Mason R., Mukherjee A.B., Stracher G.B., Streets D.G., Telmer K. Global mercury emissions to the atmosphere from anthropogenic and natural sources // *Atmos. Chem. Phys.* 2009. V. 9, N 21. P. 8317–8330. DOI: 10.5194/acp-10-5951-2010.
15. Wang F., Wang S., Zhang L., Yang H., Gao W., Wu Q., Hao J. Mercury mass flow in iron and steel production process and its implications for mercury emission control // *J. Environ. Sci.* 2016. V. 43. P. 293–301. DOI: 10.1016/j.jes.2015.07.019.
16. Wu Q., Li G., Wang S., Liu K., Hao J. Mitigation options of atmospheric Hg emissions in China // *Environ. Sci. Technol.* 2018. V. 52, N 21. P. 12368–12375. DOI: 10.1021/acs.est.8b03702.
17. Charvat P., Klimes L., Pospisil J., Klemes J.J., Varbanov P.S. An overview of mercury emissions in the energy industry – a step to mercury footprint assessment // *J. Cleaner Prod.* 2020. V. 267. P. 122087. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.122087.
18. Beckers F., Rinklebe J. Cycling of mercury in the environment: Sources, fate, and human health implications: A review // *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.* 2017. V. 47, N 9. P. 693–794. DOI: 10.1080/10643389.2017.1326277.
19. Коваль П.В., Удодов Ю.Н., Андрулайтис Л.Д., Гапон А.Е., Склярова О.А., Чернигова С.Е. Гидрохимические характеристики поверхностного стока озера Байкал (1997–2003 гг.) // *Докл. РАН.* 2005. Т. 401, № 5. С. 663–667.
20. Майсюк Е.П. Роль энергетики в экологическом состоянии Байкальской природной территории // *География и природные ресурсы.* 2017. № 1. С. 100–107. DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2017-1(100-107).
21. Королева Г.П., Холодова М.С. Оценка экологического состояния городов Приангарья по атмосферным осадкам в зимний и летний периоды // *Вестн. ИРГТУ.* 2012. Т. 66, № 7. С. 60–66.
22. Гребенщикова В.И. Геохимическая специфика состава снеговой воды некоторых городов Иркутской области // *Вода: химия и экология.* 2013. № 2. С. 19–25.
23. Lutskin E.S., Khuriganova O.I. Distribution of the total and dissolved mercury concentrations at the Irkutsk city snow sampling during winter 2021–2022 // *Limnol. Freshwater Biology.* 2022. V. 3, N 3. P. 1362–1364. DOI: 10.31951/2658-3518-2022-A-3-1362.
24. Poste A.E., Pastukhov M.V., Braaten H.F.V., Ozerisky T., Moore M. Past and present mercury accumulation in the Lake Baikal seal: Temporal trends, effects of life history, and toxicological implications // *Environ. Toxicol. Chem.* 2018. V. 37, N 5. P. 1476–1486. DOI: 10.1002/etc.4095.
25. Ефимова Н.В., Дьякович М.П., Бичева Г.Г., Лисецкая Л.Г., Коваль П.В., Андрулайтис Л.Д., Безгодов И.В. Изучение здоровья населения в условиях воздействия техногенной ртути // *Acta Biomed. Sci.* 2007. № 2. С. 75–79.
26. Леонова Г.А., Андрулайтис Л.Д. Ртуть в экосистеме Братского водохранилища // *Экология промышленного производства.* 2006. № 1. С. 12–17.
27. Китаев Н.А., Гребенщикова В.И., Лустенберг Э.Е., Ломоносов И.С., Коваль П.В. Ртуть в окружающей среде Южного Прибайкалья // *Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология.* 2008. № 6. С. 517–530.
28. Mashyanov N.R., Obolkin V.A., Pogarev S.E., Ryzhov V.V., Sholupov S.E., Potemkin V.L., Molozhnikova E.V., Khodzher T.V. Air mercury monitoring at the Baikal area // *Atmosphere.* 2021. V. 12, N 7. P. 807. DOI: 10.3390/atmos12070807.
29. Mashyanov N.R., Pogarev S.E., Sholupov S.E., Ryzhov V.V., Obolkin V.A., Khodzher T.V., Potemkin V.L., Molozhnikova E.V., Kalinchuk V.V. Air mercury monitoring in the Baikal area (2011–2021) // *Limnol. Freshwater Biology.* 2022. V. 3, N 3. P. 1315–1318. DOI: 10.31951/2658-3518-2022-A-3-1315.
30. Obolkin V., Molozhnikova E., Shikhovtsev M., Netsvetayeva O., Khodzher T. Sulfur and nitrogen oxides in the atmosphere of Lake Baikal: Sources, automatic monitoring, and environmental risks // *Atmosphere.* 2021. V. 12, N 10. P. 1–10. DOI: 10.3390/atmos12101348.
31. Shikhovtsev A.Y., Kovadlo P.G., Lezhenin A.A., Gradow V.S., Zaiko P.O., Khitrykau M.A., Kirichenko K.E., Driga M.B., Kiselev A.V., Russkikh I.V., Obolkin V.A., Shikhovtsev M.Yu. Simulating atmospheric characteristics and daytime astronomical seeing using weather research and forecasting model // *Appl. Sci.* 2023. V. 13, N 10. P. 1–19. DOI: 10.3390/app13106354.
32. ПНД Ф 14.1:2.4.271-2012 (М 01-51-2012). Количественный химический анализ вод. Методика измерений массовой концентрации ртути в пробах природных, питьевых, минеральных, сточных вод атомно-абсорбционным методом с зеемановской коррекцией неселективного поглощения на анализаторе ртути РА915М. М., 2012. С. 1–19.
33. Ковадло П.Г., Шиховцев А.Ю., Копылов Е.А., Киселев А.В., Русских И.В. Исследование оптических атмосферных искажений по данным измерений датчика волнового фронта // *Изв. вузов. Физика.* 2020. Т. 63, № 11. С. 109–114. DOI: 10.17223/00213411/63/11/109.
34. Шиховцев А.Ю. Метод определения характеристик оптической турбулентности по лучу зрения астрономического телескопа // *Оптика атмосф. и океана.* 2022. Т. 35, № 1. С. 74–80. DOI: 10.15372/AOO20220111; Shikhovtsev A.Yu. A method of determining optical turbulence characteristics by the line of sight of an astronomical telescope // *Atmos. Ocean. Opt.* 2022. V. 35, N 3. P. 303–309.
35. Stein A.F., Draxler R.R., Rolph G.D., Stunder B.J., Cohen M.D., Ngan F. NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system // *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 2015. V. 96, N 12. P. 2059–2077. DOI: 10.1175/BAMS-D-14-00110.1.
36. Балин Ю.С., Ершов А.Д., Пеннер И.Э. Лидарные корабельные исследования аэрозольных полей в атмосфере оз. Байкал // *Оптика атмосф. и океана.* 2003. Т. 16, № 5. С. 438–446.
37. Nasonov S., Balin Y., Klemasheva M., Kokhanenko G., Novoselov M., Penner I. Peculiarities of the vertical structure of atmospheric aerosol fields in the basin of Lake Baikal according to lidar observations // *Atmosphere.* 2023. V. 14, N 5. P. 837. DOI: 10.3390/atmos14050837.
38. Nasonov S., Balin Y., Klemasheva M., Kokhanenko G., Novoselov M., Penner I. Study of atmospheric aerosol in the Baikal mountain basin with shipborne and ground-based lidars // *Remote Sens.* 2023. V. 15, N 15. P. 3816. DOI: 10.3390/rs15153816.
39. Шиховцев М.Ю., Оболкин В.А., Ходжер Т.В., Моложникова Е.В. Изменчивость приземной концентрации твердых частиц РМ₁–РМ₁₀ в воздушном бассейне южного Прибайкалья // *Оптика атмосф. и океана.*

2023. Т. 36, № 6. С. 448–455. DOI: 10.15372/AOO20230604; *Shikhovtsev M.Yu., Obolkin V.A., Khodzher T.V., Molozhnikova Ye.V.* Variability of the ground concentration of particulate matter PM_1 – PM_{10} in the air basin of the Southern Baikal Region // *Atmos. Ocean. Opt.* 2023. V. 36, N 6. P. 655–662.
40. *Eyrikh S., Shol L., Shinkaruk E.* Assessment of mercury concentrations and fluxes deposited from the atmosphere on the territory of the Yamal-Nenets autonomous area // *Atmosphere*. 2022. V. 13, N 1. P. 37. DOI: 10.3390/atmos13010037.
41. *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 отделения Русского географического общества*. 2020. Т. 59, № 4. С. 83–94. DOI: 10.24411/2410-1192-2020-15909
42. *Шоль Л.В., Эйрих С.С., Ильина Е.Г.* Ртуть в атмосферных осадках г. Барнаула: сезонная и межгодовая вариабельность концентраций и потоков // *Труды молодых ученых Алтайского государственного университета*. 2020. № 17. С. 237–240.

E.S. Lutskin, M.Yu. Shikhovtsev, Ye.V. Molozhnikova, V.A. Obolkin, O.I. Berdashkinova, T.V. Khodzher. **Mercury in atmospheric air and precipitation at the monitoring station Listvyanka (Southern Baikal region) in 2022–2023.**

Gaseous elemental mercury (GEM) is the predominant form of mercury in the atmosphere. As a result of deposition, it enters terrestrial and aquatic ecosystems, where it is further transformed into the ecotoxicant methylmercury. The work is devoted to the study of gaseous elemental mercury (GEM) in atmospheric air and total mercury in atmospheric precipitation in the Southern Baikal region. Sampling was carried out at the monitoring station Listvyanka (51.9° N, 104.4° E) in 2022–2023. Mercury concentration in air was measured by mercury gas analyzer RA-915AM (St. Petersburg, Russia). The concentration of total mercury in precipitation was determined by PND F 14.1:2:4.271-2012, method A (permanganate mineralization). Statistical analysis of data on mercury content in atmospheric air and precipitation is performed. During the period under study, the concentration of GEM in atmospheric air averaged 1.61 ng/m³. The analysis showed that the pair correlation coefficient throughout the period under study was 0.47 between Hg⁰ and sulfur dioxide (SO₂) and 0.44 between Hg⁰ and nitrogen dioxide (NO₂). In 12 cases, a strong positive correlation (>0.9) between Hg⁰, SO₂, and NO₂ was observed. For each episode of mercury concentration above 2.0 ng/m³, back trajectories of air masses were calculated using the HYSPLIT model. The trajectory analysis also confirmed our assumption of a common type of source for mercury and minor gas impurities. The weighted average content of total mercury in precipitation is 44 ng/L, the median value is 29 ng/L, and the maximum is 282 ng/L. We have supplemented the existing ideas about mercury content in the atmosphere of the Southern Baikal region. It was found that despite the significant distance from large cities, the mercury content in atmospheric precipitation on the shores of Lake Baikal is comparable to the results obtained in urban agglomerations of Nepal, Canada, Korea, and China.