



УДК 551.588.74 (571.5)
DOI <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2020.34.141>

Некоторые результаты цифрового (in situ) мониторинга загрязнения атмосферы газовыми примесями в центральной экологической зоне Южного Байкала

Т. В. Ходжер, В. А. Оболкин, Е. В. Моложникова, М. Ю. Шиховцев
Лимнологический институт СО РАН, г. Иркутск, Россия

Аннотация. Приведены результаты непрерывного автоматического мониторинга переносов загрязняющих примесей на станции «Листвянка» (Южный Байкал) в 2019–2020 гг. Для исследования этих процессов применены современные автоматические цифровые методы, позволяющие отслеживать переносы в реальном масштабе времени. С разрешением от минут до суток анализируется временная изменчивость концентраций оксидов серы, азота, ртути, связанная с региональными теплоэнергоисточниками. Показано, что наиболее сильное загрязнение атмосферы в центральной экологической зоне на юге озера происходит при переносах воздушных масс с северо-северо-запада в зимний период. При переносах с юго-востока (Байкала) загрязнение атмосферы минимально. Временная изменчивость концентраций исследованных примесей происходит синхронно, что указывает на их общий источник происхождения – сжигание органического топлива на ТЭЦ в городах Иркутской области. Наиболее высокие временные колебания определены для концентраций оксидов серы и азота (от 0 до 0,2–0,3 мг/м³), менее значимы колебания концентраций ртути (от 0,5 до 4–5 нг/м³).

Ключевые слова: мониторинг атмосферы, оксиды серы, азота, газообразная ртуть.

Для цитирования: Некоторые результаты цифрового (in situ) мониторинга загрязнения атмосферы газовыми примесями в центральной экологической зоне Южного Байкала / Т. В. Ходжер, В. А. Оболкин, Е. В. Моложникова, М. Ю. Шиховцев // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2020. Т. 34. С. 141–155. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2020.34.141>

Введение

Проблема загрязнения атмосферного воздуха стала чрезвычайно серьезной и острой в последние десятилетия и вызывает все большую обеспокоенность людей. Основным критерием установления нормативов для оценки качества атмосферного воздуха является воздействие содержащихся в воздухе загрязняющих примесей на организм человека и среду обитания [Survey of Ambient ... , 2016; Yue, Gao, 2018; Assessment of relationship between ... , 2018; Evaluation of Air Pollution ... , 2018; Acid rain and ... , 2020; World Fire Statistics... , 2020].

В работе [Contributions to cities ... , 2015] приведен современный обзор загрязнения окружающей среды от различных источников в разных районах мира. Подобные исследования актуальны для изучения регионального и

межконтинентального переноса загрязняющих веществ. Известно, что загрязняющие атмосферу компоненты могут переноситься в слоях стратосферы на десятки тысяч километров. Ярким примером этого является обнаруженный у ирландского побережья шлейф газообразных примесей (NO_x , SO_2 , O_3) с максимальной мольной долей SO_2 0,9 нмоль, преодолевший расстояние 20 000 км в течение 10 дней в слоях верхней тропосферы из Восточной Азии [East Asian SO_2 ... , 2009].

Антропогенные выбросы в атмосферу являются наиболее трудно контролируемым компонентом загрязнения не только воздушной среды, но и других природных сред – водных и наземных. В связи с чрезвычайно высокой изменчивостью метеорологических условий для мониторинга процессов распространения и выпадений антропогенных примесей крайне важно применение высокоразрешающих автоматических (in situ) методов измерения как самих загрязнителей, так и метеорологических параметров. Такие методы в последние годы развиваются все успешнее и находят применение в различных сетях мониторинга – ЕМЕП, ЕАНЕТ, GMOS и др. Главными источниками поступления загрязняющих примесей в атмосферу является сжигание ископаемого топлива – каменного угля на крупных ТЭЦ, а также природные лесные пожары [A review of biomass ... , 2005; Chemical Composition of Wildland ... , 2009]. Основными примесями, выделяемыми при сжигании угля, являются оксиды серы, азота, углерода, твердые взвеси и другие примеси, в том числе газообразная ртуть. Дальность распространения выбросов различных теплоэнергетических источников прежде всего зависит от их мощности и высоты дымовых труб. В частности, было установлено загрязнение атмосферы над оз. Байкал за счет переноса оксидов серы и азота со стороны удаленных региональных ТЭЦ [Особенности пространственного распределения ... , 2014; Особенности вертикального распределения ... , 2018]. Непосредственно на территории центральной экологической зоны (ЦЭЗ) оз. Байкал функционируют 98 котельных различной мощности, 67 % из которых используют в качестве топлива уголь. Эти угольные энергоисточники поставляют в атмосферу 99 % от суммарных расчетных выбросов, или 23,8 тыс. т/год [Энергетическая инфраструктура ... , 2016]. Гораздо более мощные угольные ТЭЦ располагаются за пределами ЦЭЗ Байкала вблизи крупных промышленных центров Прибайкалья: Иркутска, Ангарска, Шелехова, Улан-Удэ, Гусиноозерска [Государственный доклад, 2020].

Соответственно, важно изучить роль местных и удаленных, но крупных внешних источников в загрязнении атмосферы в центральной экологической зоне Байкала и оценить возможные риски их воздействия на прибрежные экосистемы и озеро. Как установлено ранее, атмосферные выпадения (сухие и влажные) соединений серы и азота на акваторию озера и его бассейна оказывают влияние на химический состав вод притоков озера и на состояние лесных экосистем вокруг него [Assessing the acidification ... , 2006; Long-Range Transport ... , 2017]

Настоящее исследование посвящено анализу результатов непрерывного мониторинга процессов регионального переноса газообразных SO_2 , NO_x и Hg в районе Южного Байкала, охране которого придается все большее значение. В работе применялись современные автоматические цифровые методы, позволяющие наблюдать (отслеживать) переносы в реальном масштабе времени.

Методы

Для регистрации *in situ* процессов переноса загрязняющих атмосферных примесей на юго-западной границе центральной экологической зоны Южного Байкала были использованы данные автоматических измерений на станции мониторинга атмосферы «Листвянка» – в районе истока р. Ангары. Станция расположена на вершине прибрежного холма высотой около 200 м над уровнем озера, ее координаты: 51,8467N, 104,8930E, 670 m a.s.l. (рис. 1). Такое расположение станции позволяет избежать влияния местных источников загрязнения атмосферы (поселка) и отслеживать региональные и глобальные переносы загрязнений, в том числе распространяющиеся на высотах в пограничном слое атмосферы, что важно для наблюдений за выбросами из высоких дымовых труб крупных ТЭЦ Южного Прибайкалья.

Станция «Листвянка» работает с 2000 г. в составе Азиатской сети мониторинга кислотных выпадений EANET¹, с 2011 г. включена в глобальную сеть мониторинга ртути². Автоматические наблюдения (*in situ*) на станции начаты в 2011–2012 гг.

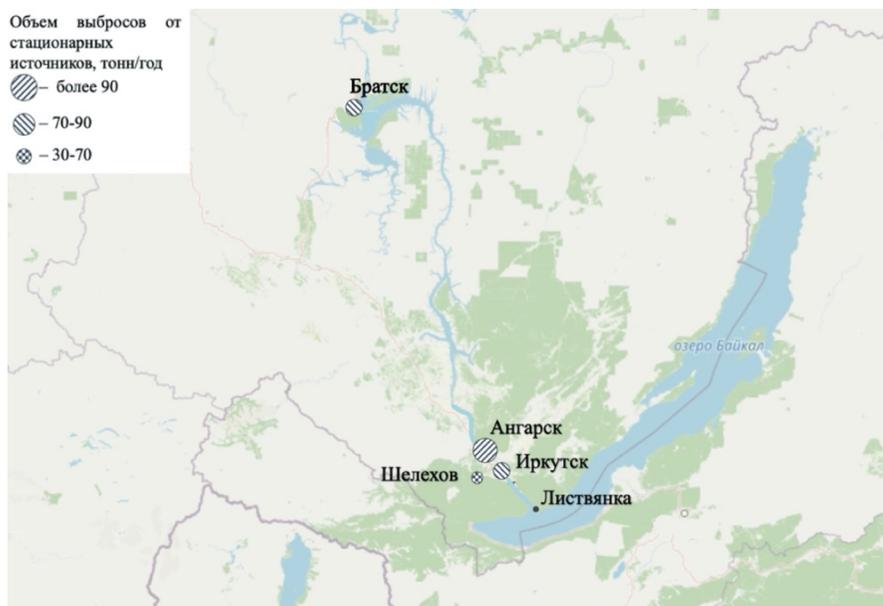


Рис. 1. Расположение станции мониторинга «Листвянка» и основных городов – источников загрязнения атмосферы Байкала

¹ www.eanet.asia.

² <http://www.gmos.eu/>

На станции ведется непрерывная автоматическая регистрация следующих атмосферных примесей и метеорологических параметров с временным разрешением от нескольких минут:

Hg (газообразная) – РА-915АМ (ЛЮМЭКС, С-Петербург, Россия), разрешение $0,5 \text{ нг/м}^3$;

SO и H₂S – СВ-320 (ОПТЭК, С-Петербург, Россия), разрешение $0,001 \text{ мг/м}^3$;

NO и NO₂ – РА-310А (ОПТЭК, С-Петербург, Россия), разрешение $0,001 \text{ мг/м}^3$;

CO – К-100 (ОПТЭК, С-Петербург, Россия), разрешение $0,001 \text{ мг/м}^3$;

CO₂ – ОПТОГАЗ 500 (ОПТЭК, С-Петербург, Россия), разрешение $0,001 \text{ мг/м}^3$;

O₃ – оптический анализатор (Dytec 1006-АНJ, Япония), разрешение 1 ppb.

Метеохарактеристики (регистр) – ультразвуковая метеостанция «Метео-2М» (ИОА СО РАН, Томск, Россия), синоптические данные (регистр) – программа Digital Atmosphere (www.weathergraphics.com).

Для оценки возможных источников поступления примесей в атмосферу ЦЭЗ Байкала и визуализации воздушных переносов от крупных промышленных источников использовалась математическая модель HYSPLIT [Draxler, Hess, 1997].

Результаты и обсуждение

Наиболее опасными для различных природных сред антропогенными выбросами в атмосферу являются оксиды серы и азота, ртуть. Соединения серы и азота выступают источниками закисления атмосферных выпадений даже в удаленных фоновых районах [Effect of long-range transport ... , 2016; Monitoring of the snow ... , 2020]. Атмосферная ртуть, осаждаясь, может накапливаться в пищевых цепях водных экосистем и образовывать ее наиболее ядовитое соединение – метилртуть [Ермаков, 2010; Atmospheric gaseous ... , 2010]. Основное поступление этих примесей в атмосферу связано со сжиганием каменных углей на крупных ТЭЦ. Для отведения этих примесей от городов используются высокие дымовые трубы – до 200 м и более. Это помогает снизить влияние выбросов на города, но может оказывать определенное влияние на природу удаленных фоновых районов – в десятках и сотнях километрах от источников. Так как выбросы крупных ТЭЦ происходят на высотах более 200 м, на условия их дальнейшего распространения воздействуют метеоусловия в пограничном слое атмосферы, которые существенно зависят от времени суток и сезона года, а также процессы синоптического масштаба. Анализ длительных наблюдений показывает, что наиболее высокие концентрации рассматриваемых примесей в районе станции «Листвянка» регистрируются в связи с переносом слабо рассеянных шлейфов выбросов из высоких труб ТЭЦ в ночные и утренние часы на верхней границе инверсионного пограничного слоя атмосферы [Мезомасштабные процессы переноса ... , 2019].

Исследования, проведенные в течение последних лет, подтверждают полученные ранее данные. На рисунке 2, а показан пример ночного (17.10.2020) переноса исследуемых примесей над станцией «Листвянка» со стороны Иркутска в режиме реального времени, из которого видно, что концентрации всех примесей повышались синхронно с 3:00–4:00 и до 8:00 ч местного времени. В остальное время концентрации окислов серы и азота были близки к нулю, концентрации ртути – к обычным фоновым значениям. Синхронность ночного повышения всех трех примесей указывает на их общий источник – предположительно, шлейф угольной ТЭЦ г. Иркутска.

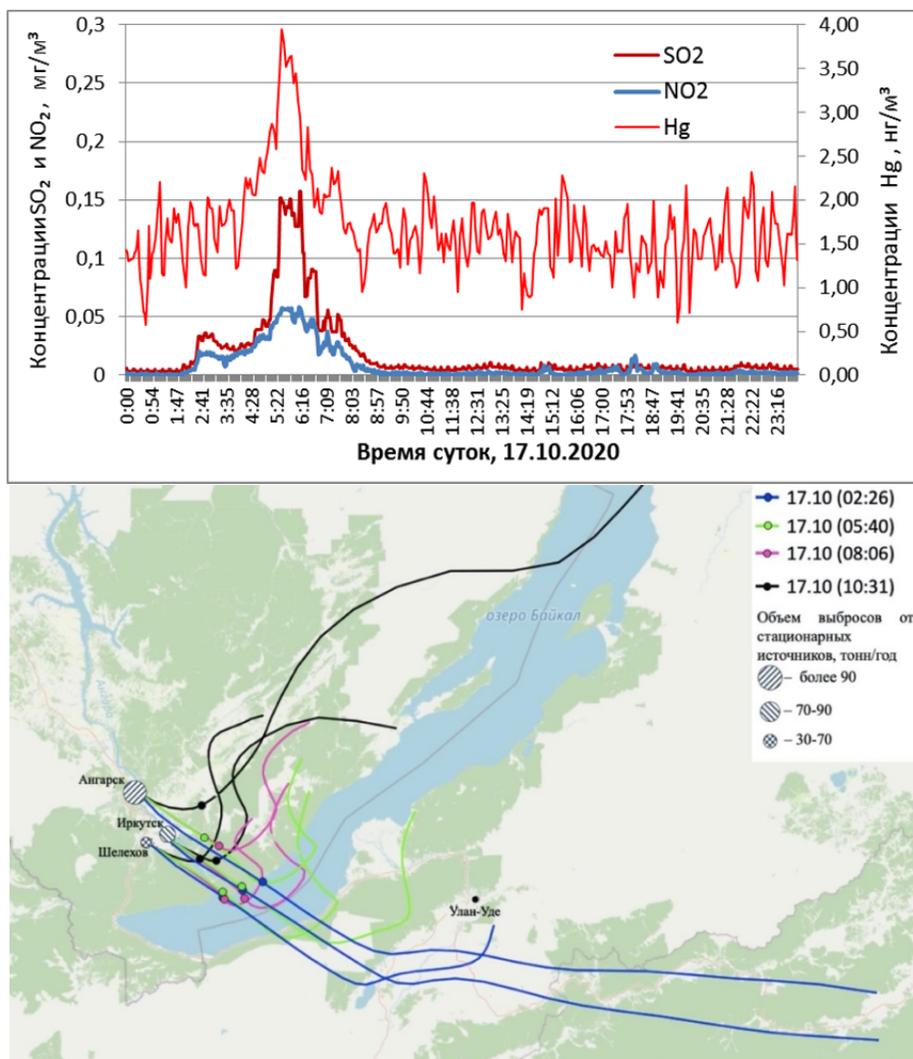


Рис. 2. Пример цифровой регистрации ночного переноса антропогенных примесей над станцией «Листвянка» 17.10.2020 (а) и прямые траектории переноса воздушных масс за этот же период со стороны крупных городов Иркутской области (б)

На рисунке 2, б представлены прямые траектории переноса воздушных масс со стороны городов-источников Иркутской области (Иркутска, Ангарска, Шелехова). Анализ проводился для 17.10.2020. Продолжительность траекторий была выбрана равной 24 ч. Расчеты прямых траекторий выполнялись для 250 м над уровнем земли (AGL). Из рисунка видно, что в момент повышения концентраций над истоком Ангары (станция «Листвянка») происходил перенос со стороны городов Ангарска, Иркутска и Шелехова (траектория выделена синим цветом). Начиная с 5:00 ч местного времени (траектория выделена зеленым цветом) перенос над станцией происходит только со стороны Иркутска и Шелехова. Дымовой шлейф от Ангарска проходит севернее, и, по наблюдениям, происходит постепенное уменьшение пика концентраций (см. рис. 2, а). После 7:00 местного времени все траектории отклонились к северу и концентрации оксидов серы и азота упали до минимальных значений (см. рис. 2, а).

Кроме влияния переноса отдельных ночных шлейфов ТЭЦ городов, повышенные концентрации рассматриваемых примесей в районе Южного Байкала могут быть связаны с более широкомасштабными и интенсивными атмосферными процессами, охватывающими в том числе и более удаленные индустриальные районы к западу от Байкала. В таких случаях наблюдаются менее высокие, но более длительные (включая дневные часы) и охватывающие более обширные районы (чем отдельные шлейфы) повышенные концентрации оксидов серы и азота (рис. 3, а, б).

Не менее тесная связь концентрации ртути с оксидами серы и азота наблюдается и для средних суточных значений, особенно в зимний период (рис. 4).

В годовом ходе максимум концентраций загрязняющих примесей в атмосфере Южного Байкала приходится на зимний период. Так, в течение зимы 2019–2020 гг. были зарегистрированы четыре случая превышения среднесуточной ПДК для SO_2 (рис. 5, а). Все эти случаи связаны с северо-северо-западными переносами, о чем говорят обратные траектории переноса воздушных масс, представленные на рис. 5, б. Траектории имеют значительное протяжение к северо-западу от Байкала (дальше Иркутска и Ангарска), что означает, вероятно, общий вклад многих удаленных антропогенных источников в загрязнение атмосферы над озером.

Из рисунка 5 видно также, что наблюдаются чрезвычайно значительные вариации концентраций загрязняющих примесей в суточном режиме от дня к дню, что, очевидно, связано с направлениями ветра – со стороны промышленных центров или со стороны фоновых районов. Таким образом, загрязнение атмосферы в ЦЭЗ Байкала сильно зависит от повторяемости тех или иных направлений переноса воздушных масс за конкретный день, месяц, год. В таблице сделана попытка оценить повторяемость направлений переноса воздушных масс на Байкал с западного сектора и в обратном направлении – со стороны Байкала – для конкретных зимних и летних месяцев 2020 г. Для этих двух направлений приведены также оценки средних и максимальных концентраций SO_2 (представлены средние медианные значения, так как распределение индивидуальных концентраций имеет сильную положительную асимметрию).

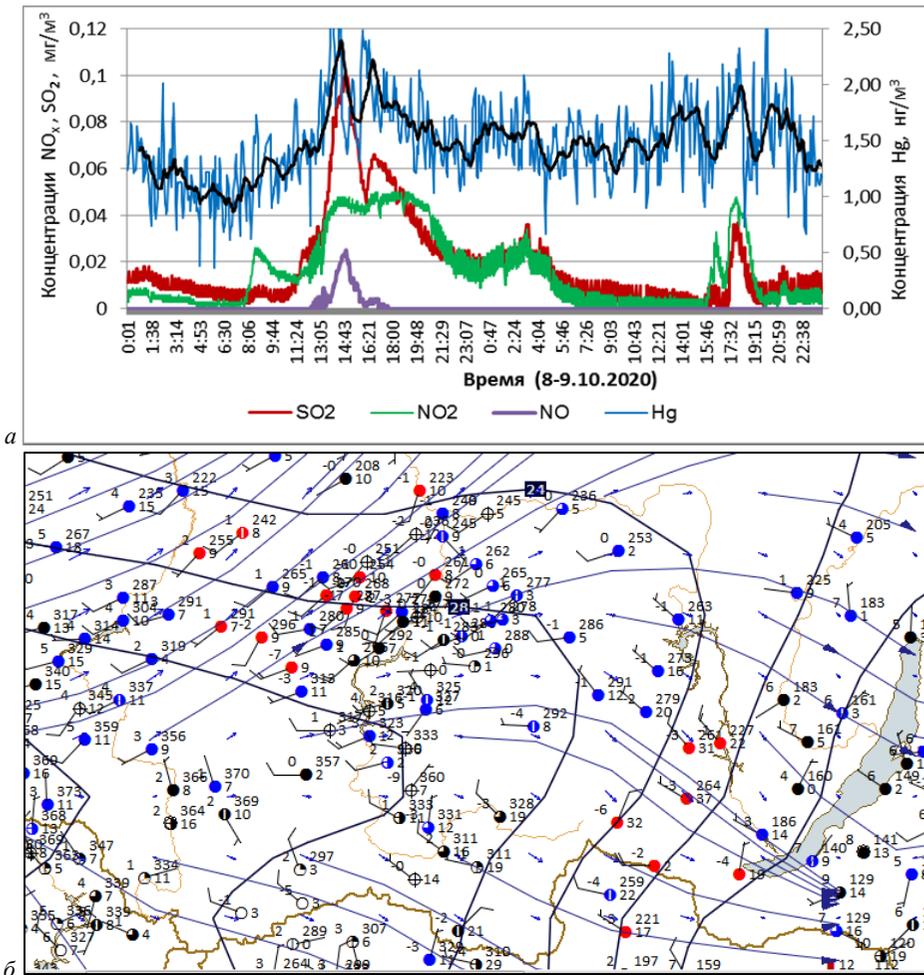


Рис. 3. Дальний и широкомасштабный перенос атмосферных примесей на оз. Байкал: а) изменчивость концентраций SO₂ 9.10.2020; б) синоптика на 9.10.2020 (17:00 ч местного времени)

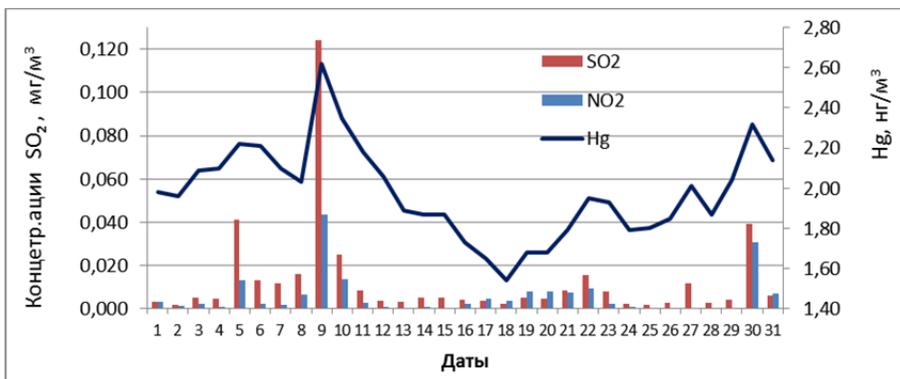


Рис. 4. Средние суточные концентрации Hg, SO₂ и NO₂ в атмосфере над станцией «Листвянка», январь 2020 г.

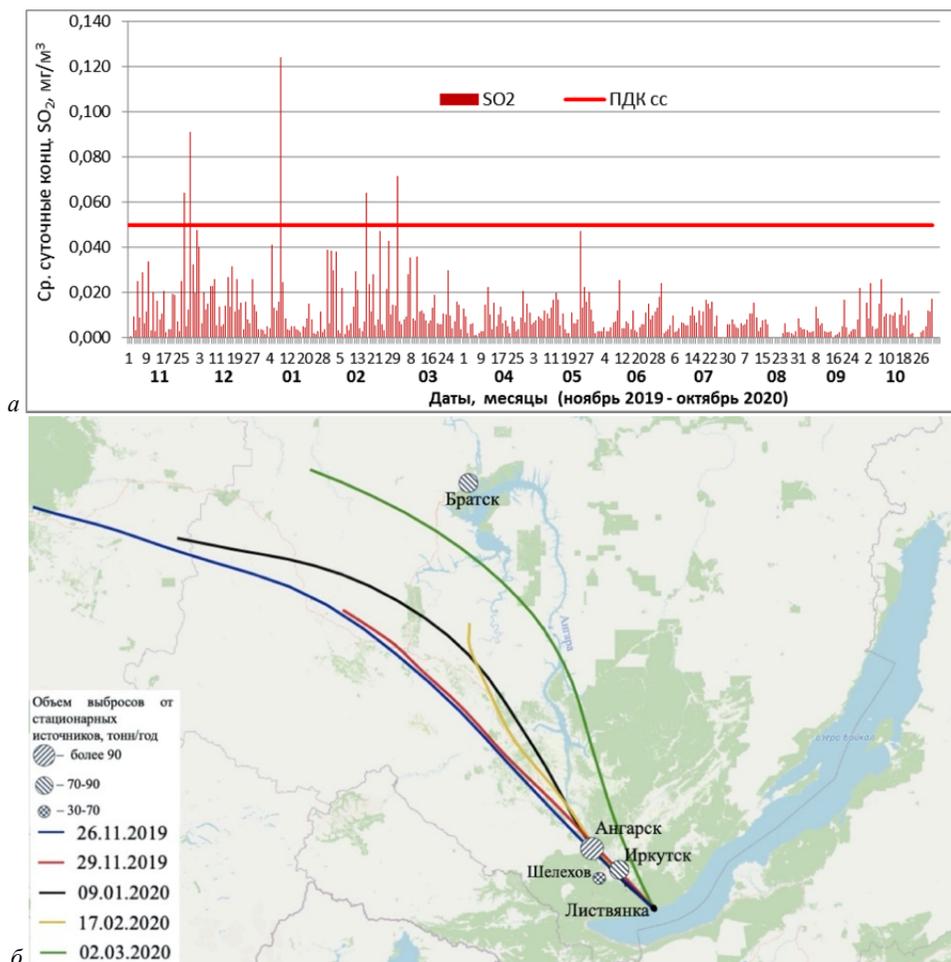


Рис. 5. Средние суточные концентрации SO₂ в период ноябрь 2019 – октябрь 2020 (а) и обратные траектории для дней с концентрациями выше ПДК_{cc} (б). Расчет для 250 м над уровнем земли (AGL)

Таблица

Средние (медиана) и максимальные (разовые) концентрации SO₂ на станции «Листвянка» в зависимости от преобладающих направлений ветров. Зима 2019–2020 г. и лето 2020 г.

Направление переноса			Зима 2019–2020 г.			Лето 2020 г.		
			Декаб.	Январь	Февр.	Июнь	Июль	Авг.
Западный сектор (200–360°)	% от числа наблюдений		44	13	27	54	42	66
	Концентр. SO ₂ , мг/м ³	Медиана	<u>0,020</u>	<u>0,036</u>	<u>0,029</u>	<u>0,008</u>	<u>0,009</u>	<u>0,007</u>
		Максимум	0,203	0,269	0,319	0,103	0,058	0,057
Восточный сектор (45–200°)	% от числа наблюдений		42	78	62	20	19	33
	Концентр. SO ₂ , мг/м ³	Медиана	<u>0,006</u>	<u>0,006</u>	<u>0,006</u>	<u>0,006</u>	<u>0,007</u>	<u>0,004</u>
		Максимум	0,015	0,010	0,010	0,012	0,021	0,019

Из таблицы видно, что наиболее высокие концентрации (и медианные, и максимальные) отмечаются в зимние месяцы при ветрах северо-западного сектора. Летом при этих же направлениях медианные значения существенно ниже, но максимальные остаются достаточно высокими. При ветрах со стороны Байкала и в зимние и в летние месяцы на станции отмечаются наиболее низкие значения концентраций (для средних и для максимальных величин). Последнее указывает на то, что местные источники в ЦЭЗ оказывают гораздо меньшее влияние на качество атмосферы, чем крупные региональные и более удаленные.

В связи с тем что максимальное загрязнение атмосферы над Байкалом связано с западным переносом воздушных масс, очень существенную роль играет повторяемость этих направлений за год или месяц. Обычно она составляет 40–50 %, но в январе 2020 г. достигла всего лишь 13 %, в феврале – 27 % (см. табл.). Это означает, что в январе 2020 г. атмосфера на Байкале была чище, чем обычно, что отражено на рис. 4. Можно отметить повышенные максимальные концентрации для обоих направлений переноса летом 2020 г. при минимальных средних концентрациях, что, вероятно, связано с периодическим влиянием лесных пожаров в этот период на Байкальской природной территории.

Опасность переноса и выпадений оксидов серы и азота, а также ртути для различных экосистем хорошо известна и широко обсуждается во многих публикациях [The consequences of liming ... , 1995;; Moiseenko, 2002; Lozovik, 2006] Оксиды серы и азота являются причиной закисления атмосферных выпадений. Так, имеющиеся на сегодня исследования показывают, что именно на Южном Байкале фиксируется самая высокая кислотность атмосферных выпадений в регионе – значительно выше, чем вокруг самих городов-источников и тем более в фоновых районах. Хотя опасность понижения кислотности вод самого Байкала маловероятна из-за его огромной глубины, существует реальная опасность закисления почв прибрежных лесных экосистем. Помимо этого, благодаря химическим превращениям оксидов азота в процессе переноса (окисления атмосферным озоном) на озеро выпадает дополнительное количество антропогенных нитратов, которые являются питательным элементом для водорослей и могут способствовать эвтрофикации водных экосистем [Nearshore benthic blooms ... , 2014].

Повышенные концентрации атмосферной ртути, связанные с переносом выбросов ТЭЦ на Байкал, выглядят менее значительными (в 3–5 раз), чем рост концентраций оксидов серы и азота, которые могут повышаться в десятки и сотни раз. Однако известно, что в процессе миграции в водных экосистемах происходит биоаккумуляция атмосферной ртути в пищевых цепях гидробионтов, а также образование ее наиболее токсичного соединения – метилртути. Поэтому дальнейшие пути миграции атмосферной ртути на Байкале еще требуют тщательного исследования.

Заключение

Применение автоматических высокоразрешающих газоанализаторов атмосферных примесей и метеорологических параметров позволяет в реальном масштабе времени контролировать поступление атмосферных загрязнений в центральную экологическую зону Южного Байкала. В зависимости от метеорологических и синоптических условий наблюдения демонстрируют высокую изменчивость концентраций антропогенных примесей в атмосфере над Южным Байкалом. Существуют два основных механизма загрязнения атмосферы в центральной экологической зоне Байкала: первый – прямой перенос индивидуальных слабо рассеянных шлейфов отдельных региональных ТЭЦ со струйными воздушными течениями на верхней границе ночных пограничных слоев атмосферы (от 200 до 500 м над уровнем земли); второй – крупномасштабный северо-западный перенос смешанных выбросов многих региональных и удаленных источников под влиянием процессов синоптического масштаба.

Накопленные данные указывают на значительные поступления атмосферных загрязнений через юго-западную границу Южного Байкала, прежде всего со стороны региональных индустриальных центров, расположенных к западу, северо-западу от озера, по открытой к Байкалу долине р. Ангары. Малочисленные населенные пункты, расположенные на побережье, ввиду малых объемов выбросов не вносят существенного вклада в загрязнение атмосферы озера.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, проект № 075-15-2020-787 «Фундаментальные основы, методы и технологии цифрового мониторинга и прогнозирования экологической обстановки Байкальской природной территории», блок 3.

Список литературы

Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Иркутской области в 2019 году». Иркутск : Мегапринт, 2020. 314 с.

Ермаков В. В. Биогенная миграция и детоксикация ртути. М. : ГЕО-Х РАН., 2010. 477 с.

Особенности пространственного распределения диоксида серы в Прибайкалье по данным маршрутных измерений и численных экспериментов // В. А. Оболкин, В. Л. Потемкин, В. Л. Макухин, Е. В. Чипанина, И. И. Мариинате // Метеорология и гидрология. 2014. № 12. С. 35–41.

Мезомасштабные процессы переноса атмосферных загрязнений в районе южного Байкала / В. А. Оболкин, Ю. В. Шаманский, Т. В. Ходжер, А. В. Фалиц // Океанологические исследования. 2019. Т. 47, № 3. С. 104–113. <https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2019.47>

Особенности вертикального распределения аэрозолей и газовых примесей в регионе оз. Байкал / В. Л. Потемкин, И. Латышева, В. Л. Макухин, Т. Г. Потемкина // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2019. Т. 27. С. 111–121. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2019.27.1111>

Энергетическая инфраструктура центральной экологической зоны: воздействие на природную среду и пути его снижения / Б. Г. Санеев, И. Ю. Иванова, Е. П. Майсюк, Т. Ф. Тугузова, Р. А. Иванов // География и природные ресурсы, 2016, № 5, С. 218–224.

A review of biomass burning emissions. Part 2: Intensive physical properties of biomass burning particles / J. Reid, R. Koppmann, T. Eck, D. Eleuterio // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2005. Vol. 5. P. 799–825. <https://doi.org/10.5194/acp-5-799-2005>

Acid rain and air pollution: 50 years of progress in environmental science and policy / P. Grennfelt, A. Engleryd, M. Forsius, Ø. Hov, H. Rodhe, E. Cowling // *Ambio*. 2020. Vol. 49. P. 849–864. <https://doi.org/10.1007/s13280-019-01244-4>

Assessing the acidification risk in the lake Baikal region / M. Yu. Semenov, T. V. Khodzher, V. A. Obolkin, V. M. Domysheva, L. P. Golobokova, N. A. Kobeleva, O. G. Netsvetaeva, V. L. Potemkin, R. Van Grieken, N. Fukuzaki // *Chemistry and Ecology*. 2006. Vol. 22, N 1. P. 1–11. <https://doi.org/10.1080/02757540500456955>

Assessment of relationship between meteorological elements and air pollutants load in an urban environment / I. Ionel, L. Makra, Z. Csépe, G. Tusnády, C. Cercelaru, C. Ioan Ungureanu // *Journal of Environmental Protection and Ecology*. 2018. N 4. P. 1462–1471.

Atmospheric gaseous elemental mercury (GEM) concentrations and mercury depositions at a high-altitude mountain peak in south China / X. W. Fu, Z. Q. Dong, X. Feng, R. S. Yin, J. X. Wang, Z. R. Yang, H. Zhang // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2010. N 10. P. 2425–2437. <https://doi.org/10.5194/acp-10-2425-2010>

Contributions to cities ambient particulate matter (PM): A systematic review of local source contributions at global level / F. Karagulian, C. A. Belis, C. Dora, Prüss- A. M. Ustün, S. Bonjour, H. Adair-Rohani, M. Amann // *Atmospheric Environment*. 2015. Vol. 120. P. 475–483. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.08.087>

Draxler R. R., Hess G. D. Description of the HYSPLIT – 4 modeling system. Silver Springs, MD Publ., 1997. 522 p.

East Asian SO₂ pollution plume over Europe – Part 1: Airborne trace gas measurements and source identification by particle dispersion model simulations / V. Fiedler, R. Nau, S. Ludmann, F. Arnold, H. Schlager, A. Stohl // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2009. Vol. 9. P. 4717–4728. <https://doi.org/10.5194/acp-9-4717-2009>

Effect of long-range transport of sulphur and nitrogen oxides from large coal power plants on acidification of river waters in the Baikal region, East Siberia / V. A. Obolkin, T. V. Khodzher, L. M. Sorokovikova, I. V. Tomberg, O. G. Netsvetaeva, L. P. Golobokova // *International Journal of Environmental Studies*. 2016. Vol. 73, N 3. P. 452–461. <https://doi.org/10.1080/00207233.2016.1165481>

Evaluation of Air Pollution by NO₂, SO₂, PM₁₀ in Bucharest / C. Rusanescu, C. Jinescu, M. Rusanescu, M. Begea, O. Ghermec // *Revista de Chimie*. 2018. Vol. 69, N 1. P. 105–111. <https://doi.org/10.37358/RC.18.1.6053>

Long-Range Transport of Plumes of Atmospheric Emissions from Regional Coal Power Plants to the South Baikal Water Basin / V. A. Obolkin, V. L. Potemkin, V. L. Makukhin, T. V. Khodzher, E. V. Chipanina // *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2017. Vol. 30, N 4. P. 360–365. <https://doi.org/10.1134/S1024856017040078>

Lozovik P. A. Tolerance of water objects to acidification depending on their specific drainage areas – a case study of lakes and rivers in the basin of the Shuya River (Onezhskaya) water // *Water resources*. 2006. Vol. 13 (22). P. 188–194.

Miller J. D., Anderson H. A., Harriman R. The consequences of liming a highly acidified catchment in central Scotland // *Water Air Soil Pollution*. 1995. Vol. 85, N 2. P. 1015–1020.

Moiseenko T. I. The determination of the critical loads of acid deposition for surface waters // *Water resources*. 2002. Vol. 3. P. 322–328.

Monitoring of the snow cover chemical composition and its role in the acidification of the southern Baikal tributaries // L. M. Sorokovikova, O. G. Netsvetaeva, I. V. Tomberg, Y. V. Molozhnikova Proceedings of SPIE 11560, 26th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics, “Atmospheric Physics”. Moscow, 2020. <https://doi.org/10.1117/12.2574786>

Nearshore benthic blooms of filamentous green algae in Lake Baikal / L. S. Kravtsova, L. A. Izhboldina, I. V. Khanaev, G. V. Pomazkina, E. V. Rodionova, V. M. Domysheva,

M. V. Sakirko, I. V. Tomberg, T. Ya. Kostornova, O. S., Kravchenko A. B. Kupchinsky // J. Great Lakes Res. 2014. Vol. 40. P. 441–448. <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2014.02.019>

Survey of Ambient Air Pollution Health Risk Assessment Tools / S. C. Anenberg, A. Belova, J. Brandt, N. Fann, S. Greco, S. Guttikunda, M. E. Heroux, F. Hurley, M. Krzyzanowski, S. Medina, B. Miller, K. Pandey, J. Roos, R. van Dingenen // Risk Analysis. 2016. Vol. 36, N 9. P. 1718–1736. <https://doi.org/10.1111/risa.12540>

Urbanski S. P., Hao W. M., Baker S. Chemical Composition of Wildland Fire Emissions // Developments in Environmental Sciencem. 2009. Vol. 8. P. 79–107. [https://doi.org/10.1016/S1474-8177\(08\)00004](https://doi.org/10.1016/S1474-8177(08)00004).

World Fire Statistics: Report / N. Brushlinsky, M. Ahrens, S. Sokolov, P. Wagner. Available at: https://ctif.org/sites/default/files/2020-06/CTIF_Report25.pdf (date of access: 01.11.2020).

Yue X. L., Gao Q. X. Contributions of natural systems and human activity to greenhouse gasemissions // Advances in Climate Change Research. 2018. Vol. 9, N 4. P. 243–252. <https://doi.org/10.1016/j.accre.2018.12.003>

Some Results of Digital (in situ) Monitoring of Atmospheric Pollution with Gaseous Impurities in the Central Ecological Zone of South Baikal

T. V. Khodzher, V. A. Obolkin, E. V. Molozhnikova, M. Yu. Shikhovtsev
Limnological Institute SB RAS, Irkutsk, Russian Federation

Abstract. The article presents the results of continuous automatic monitoring of atmospheric transport of pollutants in the source area of the Angara river (South Baikal) at the “Listvyanka” atmospheric monitoring station in 2019–2020. The temporal variability of the concentrations of oxides of sulfur, nitrogen, and mercury in the atmosphere of the central ecological zone of the lake Baikal is analyzed with high resolution from minutes to days. The use of automatic high-resolution gas analyzers for atmospheric impurities and meteorological parameters allows real-time monitoring of the flow of atmospheric pollution into the central ecological zone of South Baikal. Depending on the meteorological and synoptic conditions, observations demonstrate a high variability in the concentrations of anthropogenic impurities in the atmosphere over South Baikal. It is shown that the most severe atmospheric pollution occurs during the transfer of air masses from the north-northwest in winter. When transported from the South Baikal, atmospheric pollution is minimal. The temporal variability of the concentrations of the studied impurities occurs synchronously, which indicates their common source of origin – the combustion of fossil fuel. The highest time fluctuations are determined for the concentrations of sulfur and nitrogen oxides, the fluctuations in mercury concentrations are less significant. The average (median) and maximum (one-time) concentrations of sulfur oxides at “Listvyanka” station are given, depending on the prevailing wind directions. Direct trajectories of air mass transfer from the source cities of the Irkutsk region (Irkutsk, Angarsk, Shelekhov) are presented. At the time of the increase in the concentration of gas impurities at the “Listvyanka” station, pollution was transferred from the industrial complexes of the Baikal region. In the conclusion of the article, it is concluded that there are two main mechanisms of atmospheric pollution in the central ecological zone of Lake Baikal: direct transfer of individual weakly scattered plumes of separate regional thermal power plants with jet air currents at the upper boundary of the night boundary layers of the atmosphere (from 200 to 500 m above ground level); large-scale northwestern transport of mixed emissions from many regional and remote sources under the influence of synoptic-scale processes. Small settlements located on the coast, due to small volumes of emissions, do not make a significant contribution to the pollution of the lake's atmosphere. The

work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (grant No. 075-15-2020-787 for implementation of large scientific project «Fundamentals, methods and technologies for digital monitoring and forecasting of the environmental situation on the Baikal natural territory»).

Keywords: atmospheric monitoring, sulfur oxides, nitrogen oxides, gaseous mercury.

For citation: Khodzher T.V., Obolkin V.A., Molozhnikova E.V., Shikhovtsev M.Yu. Some Results of Digital (in situ) Monitoring of Atmospheric Pollution with Gaseous Impurities in the Central Ecological Zone of South Baikal. *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences*, 2020, vol. 34, pp. 141-155. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2020.34.141> (in Russian)

References

Gosudarstvennyi doklad “O sostoyanii i ob okhrane okruzhayushchei sredy Irkutskoi oblasti v 2019 godu”. [State Reports “On State and Protection of the Irkutsk Region Environment”]. Irkutsk, Megaprint Publ., 2020, 314 p. (in Russian)

Ermakov V.V. *Biogennaya migratsiya i detoksikatsiya rtuti* [Biogenic migration and detoxification of mercury]. Moscow, GEO-HI RAS Publ., 2010, 477 p. (in Russian)

Obolkin V.A., Potemkin V.L., Makukhin V.L., Chipanina E.V., Marinayte I.I. Osobennosti prostranstvennogo raspredeleniya dioksida sery v Pribaikalie po dannym marshrutnykh izmerenii i chislennykh eksperimentov [Features of the spatial distribution of sulfur dioxide in the Baikal region according to route measurements and numerical experiments]. *Meteorology and Hydrology*, 2014, no. 12, pp. 35-41. (in Russian)

Obolkin V.A., Shamansky Yu.V., Khodzher T.V., Falits A.V. Mezomasshtabnye protsessy perenosa atmosferynykh zagryaznenii v raione Yuzhnogo Baikala [Mesoscale processes of atmospheric pollution transfer in the area of South Baikal]. *Oceanological research*, 2019, vol. 47, no. 3, pp. 104-113. <https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2019.47> (in Russian)

Potemkin V.L., Latsheva I.V., Makukhin V.L., Potemkina T.G., Osobennosti vertikalnogo raspredeleniya aerozolei i gazovykh primesei v regione oz. Baikal [Features of the vertical distribution of aerosols and gas impurities in the region of the lake Baikal]. *Izvestia ISU. Series Earth Sciences* [The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences], 2019, vol. 27, pp. 111-121. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2019.27.1111> (in Russian)

Saneev B.G., Ivanova I.Yu., Maisyuk E.P., Tuguzova T.F., Ivanov R.A. Energeticheskaya infrastruktura tsentralnoi ekologicheskoi zony: vozdeistvie na prirodnyuyu sredu i puti ego snizheniya [The power generation infrastructure in the central ecological zone of the Baikal natural territory: the environmental impact and ways to mitigate it]. *Geography and natural resources*, 2016, no. 5, pp. 218-224. (in Russian)

Reid J., Koppmann R., Eck T., Eleuterio D. A review of biomass burning emissions. Part 2: Intensive physical properties of biomass burning particles. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2005, vol. 5, pp. 799-825. <https://doi.org/10.5194/acp-5-799-2005>

Grennfelt P., Englerød A., Forsius M., Hov Ø., Rodhe H., Cowling E. Acid rain and air pollution: 50 years of progress in environmental science and policy. *Ambio*, 2020, vol. 49, pp. 849-864. <https://doi.org/10.1007/s13280-019-01244-4>

Semenov M.Yu., Khodzher T.V., Obolkin V.A., Domysheva V.M., Golobokova L.P., Kobeleva N.A., Netsvetaeva O.G., Potemkin V.L., Van Grieken R., Fukuzaki N. Assessing the acidification risk in the lake Baikal region. *Chemistry and Ecology*, 2006, vol. 22, no. 1, pp. 1-11. <https://doi.org/10.1080/02757540500456955>

Ionel I., Makra L., Csépe Z., Tusnády G., Cercelaru C., Ioan Ungureanu C. Assessment of relationship between meteorological elements and air pollutants load in an urban environment. *Journal of Environmental Protection and Ecology*, 2018, no. 4, pp. 1462-1471.

Fu X.W., Dong Z.Q., Feng X., Yin R.S., Wang J.X., Yang Z.R., Zhang H. Atmospheric gaseous elemental mercury (GEM) concentrations and mercury depositions at a high-altitude mountain peak in south China. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, no. 10, pp. 2425-2437. <https://doi.org/10.5194/acp-10-2425-2010>

Karagulian F., Belis C.A., Dora C., Prüss-Ustün A.M., Bonjour S., Adair-Rohani H., Amann M. Contributions to cities ambient particulate matter (PM): A systematic review of local source contributions at global level. *Atmospheric Environment*, 2015, vol. 120, pp. 475-483. doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.08.087

Draxler R.R., Hess G.D., *Description of the HYSPLIT – 4 modeling system*. Silver Springs, MD Publ., 1997, 522 p.

Fiedler V., Nau R., Ludmann S., Arnold F., Schlager H., Stohl A. East Asian SO₂ pollution plume over Europe – Part I: Airborne trace gas measurements and source identification by particle dispersion model simulations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, vol. 9, pp. 4717-4728. https://doi.org/10.5194/acp-9-4717-2009

Obolkin V.A., Khodzher T.V., Sorokovikova L.M., Tomberg I.V., Netsvetaeva O.G., Golobokova L.P. Effect of long-range transport of sulphur and nitrogen oxides from large coal power plants on acidification of river waters in the Baikal region, East Siberia. *International Journal of Environmental Studies*, 2016, vol. 73, no. 3, pp. 452-461. https://doi.org/10.1080/00207233.2016.1165481

Rusanescu C., Jinescu C., Rusanescu M., Begea M., Ghermec O. Evaluation of Air Pollution by NO₂, SO₂, PM₁₀ in Bucharest. *Revista de Chimie*, 2018, vol. 69, no. 1, pp. 105-111. https://doi.org/10.37358/RC.18.1.6053

Obolkin V.A., Potemkin V.L., Makukhin V.L., Khodzher T.V., Chipanina E.V. Long-Range Transport of Plumes of Atmospheric Emissions from Regional Coal Power Plants to the South Baikal Water Basin. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2017, vol. 30, no. 4, pp. 360-365. https://doi.org/10.1134/S1024856017040078

Lozovik P.A. Tolerance of water objects to acidification depending on their specific drainage areas – a case study of lakes and rivers in the basin of the Shuya River (Onezhskaya) water. *Water resources*, 2006, vol. 13(22), pp. 188-194.

Miller J.D., Anderson H.A., Harriman R. The consequences of liming a highly acidified catchment in central Scotland. *Water Air Soil Pollution*, 1995, vol. 85, no. 2, pp. 1015-1020.

Moiseenko T.I. The determination of the critical loads of acid deposition for surface waters. *Water resources*, 2002, vol. 3, pp. 322-328.

Sorokovikova L.M., Netsvetaeva O.G., Tomberg I.V., Molozhnikova Y.V. Monitoring of the snow cover chemical composition and its role in the acidification of the southern Baikal tributaries. *Proceedings of SPIE 11560, 26th International Symposium on Atmospheric and Oceanic Optics, "Atmospheric Physics"*. Moscow, 2020. https://doi.org/10.1117/12.2574786

Kravtsova L.S., Izhboldina L.A., Khanaev I.V., Pomazkina G.V., Rodionova E.V., Domyshcheva V.M., Sakirko M.V., Tomberg I.V., Kostornova T.Ya., Kravchenko O.S., Kupchinsky A.B. Nearshore benthic blooms of filamentous green algae in Lake Baikal. *J. Great Lakes Res.*, 2004, vol. 40, pp. 441-448. https://doi.org/10.1016/j.jglr.2014.02.019

Anenberg S.C., Belova A., Brandt J., Fann N., Greco S., Guttikunda S., Heroux M.E., Hurley F., Krzyzanowski M., Medina S., Miller B., Pandey K., Roos J., Van Dingenen R. Survey of Ambient Air Pollution Health Risk Assessment Tools. *Risk Analysis*, 2016, vol. 36, no. 9, pp. 1718-1736. https://doi.org/10.1111/risa.12540

Urbanski S.P., Hao W.M., Baker S. Chemical Composition of Wildland Fire Emissions. *Developments in Environmental Sciencem*, 2009, vol. 8, pp. 79-107. https://doi.org/10.1016/S1474-8177(08)00004.

Brushlinsky N., Ahrens M., Sokolov S., Wagner P. World Fire Statistics: Report. Available at: https://ctif.org/sites/default/files/2020-06/CTIF_Report25.pdf (date of access: 01.11.2020).

Yue X.L., Gao Q.X. Contributions of natural systems and human activity to greenhouse gas emissions. *Advances in Climate Change Research*, 2018, vol. 9, no. 4, pp. 243-252. https://doi.org/10.1016/j.accre.2018.12.003

Ходжер Тамара Викторовна

доктор географических наук, профессор,
заведующая, лаборатория гидрохимии
и химии атмосферы
Лимнологический институт СО РАН
Россия, 664003, г. Иркутск,
ул. Улан-Баторская, 3
e-mail: khodzher@lin.irk.ru

Khodzher Tamara Victorovna

Doctor of Sciences (Geography), Professor
Head of Laboratory of Hydrochemistry
and Atmosphere Chemistry
Limnological Institute SB RAS
3, Ulan-Batorskaya st., Irkutsk, 664003,
Russian Federation
e-mail: khodzher@lin.irk.ru

Оболкин Владимир Аркадьевич

кандидат географических наук,
старший научный сотрудник
Лимнологический институт СО РАН
Россия, 664003, г. Иркутск,
ул. Улан-Баторская, 3
e-mail: obolkin@lin.irk.ru

Obolkin Vladimir Arcadieievich

Candidate of Sciences (Geography),
Senior Research Scientist
Limnological Institute SB RAS
3, Ulan-Batorskaya st., Irkutsk, 664003,
Russian Federation
e-mail: obolkin@lin.irk.ru

Моложникова Елена Владимировна

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник
Лимнологический институт СО РАН
Россия, 664003, г. Иркутск,
ул. Улан-Баторская, 3
e-mail: yelena@lin.irk.ru

Molozhnikova Yelena Vladimirovna

Candidate of Sciences (Technical),
Senior Research Scientist
Limnological Institute SB RAS
3, Ulan-Batorskaya st., Irkutsk, 664003,
Russian Federation
e-mail: yelena@lin.irk.ru

Шиховцев Максим Юрьевич

инженер
Лимнологический институт СО РАН
Россия, 664003, г. Иркутск,
ул. Улан-Баторская, 3
e-mail: max97Irk@lin.irk.ru

Shikhovtsev Maxim Yurievich

Engineer
Limnological Institute SB RAS
3, Ulan-Batorskaya st., Irkutsk, 664003,
Russian Federation
e-mail: max97Irk@lin.irk.ru