

УДК 551.510.42

Дальний перенос шлейфов атмосферных выбросов региональных угольных ТЭЦ на акваторию Южного Байкала

В.А. Оболкин, В.Л. Потемкин, В.Л. Макухин, Т.В. Ходжер, Е.В. Чипанина*

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

Поступила в редакцию 16.01.2016 г.

Сравниваются реально наблюдавшиеся случаи региональных переносов атмосферных загрязнений на Байкал с расчетами по математической модели. По данным наблюдений, наиболее сильное загрязнение атмосферы над озером связано с переносами диоксидов серы и азота от крупных угольных ТЭЦ как со стороны Иркутска и Ангарска, так и со стороны Бурятии (Улан-Удэ и Гусиноозёрск). Особенно мощные переносы окислов серы и азота в атмосферу Байкала происходят в ночное время, в инверсионных метеорологических условиях, в виде слабо рассеянных шлейфов из высоких труб ТЭЦ. Данные автоматических измерений концентраций окислов серы и азота демонстрируют, что реальные механизмы переноса антропогенных примесей на Байкал более сложны и разнообразны, по сравнению с результатами, получаемыми при моделировании. Модельные оценки концентраций SO_2 над озером достаточно близки к средним месячным измеренным концентрациям, но не объясняют некоторые особые случаи образования высоких концентраций примесей в атмосфере Байкала.

Ключевые слова: атмосферные загрязнения, диоксиды серы и азота, атмосферный перенос; atmospheric pollution, sulphur and nitrogen dioxides, atmospheric transfer.

Введение

В индустриально развитых регионах Сибири до 70–80% выбросов загрязняющих веществ в атмосферу приходится на крупные угольные ТЭЦ. Основу выбросов таких ТЭЦ составляют оксиды серы, азота, углерода, а также аэрозоли разного размера и состава. Наибольшую опасность для окружающей среды представляют окислы серы и азота, оказывающие как прямое воздействие — через превышение ПДК, так и косвенное — через закисление атмосферных выпадений. Большая часть эмиссии серы и азота такими ТЭЦ происходит на значительных высотах (высота труб плюс высота подъема нагретых газов) в виде мощных дымовых шлейфов. В связи с этим дальность распространения шлейфов зависит от метеорологических условий в пограничном слое атмосферы (ПСА), которые весьма изменчивы в течение суток и от сезона к сезону.

Отсутствие экспериментальных данных о вертикальном распределении антропогенных примесей и метеопараметров в ПСА затрудняет количественные оценки объемов и дальности переноса загрязнений со шлейфами ТЭЦ. Существует большое количество

публикаций, посвященных модельным оценкам пространственного распределения загрязнений в приземном слое атмосферы вокруг населенных пунктов, и сравнительно немного экспериментальных работ, исследующих механизмы дальнего переноса примесей именно от высоких источников — труб ТЭЦ. Тем не менее в результате немногочисленных натурных наблюдений было установлено, что основным механизмом дальнего переноса загрязнений от таких высоких источников являются так называемые струйные течения низкого уровня, возникающие на верхней границе ПСА обычно в ночные часы при температурных инверсиях и ослабленной турбулентности [1–3]. Поэтому их второе распространенное название — «ночные струи». Если шлейфы ТЭЦ попадают в зону действия таких струй, то основная масса атмосферных загрязнений может переноситься ими на сотни километров без существенного рассеяния и осаждения. Возможность такого переноса шлейфов на Южный Байкал была подтверждена, в частности, самолетными наблюдениями, проведенными Томским Институтом оптики атмосферы СО РАН [4].

В предлагаемой статье приводятся экспериментальные свидетельства существования таких механизмов дальнего переноса выбросов на Южный Байкал от крупнейших угольных ТЭЦ, расположенных вокруг гг. Иркутск и Ангарск — в 70–100 км к северо-западу от Байкала, а также от ТЭЦ гг. Улан-Удэ и Гусиноозёрск, расположенных примерно на тех же расстояниях к юго-востоку от озера.

* Владимир Аркадьевич Оболкин (obolkin@lin.irk.ru); Владимир Львович Потемкин (klimat@lin.irk.ru); Владимир Леонидович Макухин (aerosol@lin.irk.ru); Тамара Викторовна Ходжер (khodzher@lin.irk.ru); Елена Владимировна Чипанина (yelena@lin.irk.ru).

Суммарная эмиссия серы и азота Иркутско-Ангарскими ТЭЦ составляет более 100 тыс. т SO_2 и около 60–80 тыс. т NO_x в год. Гусиноозёрская ГРЭС и г. Улан-Удэ вместе выбрасывают около 22 тыс. т SO_2 и 17 тыс. т NO_x в год. В самой котловине Южного Байкала небольшие города Слюдянка и Байкальск суммарно выбрасывают в атмосферу не более 2 тыс. т SO_2 и 1,5 тыс. т NO_x в год [5].

Методы

Основные круглогодичные наблюдения за региональными переносами атмосферных загрязнений на Южный Байкал проводятся на постоянной станции мониторинга атмосферы Листвянка, расположенной на территории Астрофизической обсерватории Института солнечно-земной физики СО РАН. Обсерватория расположена на одном из прибрежных холмов (около 250 м над уровнем озера) в районе истока р. Ангары. Такое высотное расположение станции позволяет избегать влияния местных источников загрязнений и, как оказалось, периодически отслеживать именно струйные переносы шлейфов от Иркутско-Ангарских ТЭЦ. Станция оборудована комплексом автоматических измерителей SO_2 , NO , NO_2 (хемолюминесцентные анализаторы «Оптэк», Россия), O_3 (оптический анализатор, Япония), а также акустической метеостанцией «Метео-6» Томского Института оптики атмосферы СО РАН. Чувствительность газоанализаторов – 1 мкг/м^3 , временное разрешение – 1–2 мин.

Помимо стационарных наблюдений на станции Листвянка проводились также маршрутные измерения SO_2 и NO_x над акваторией Южного Байкала с борта НИС «Папанин» с целью оценки пространственного распределения исследуемых примесей над акваторией озера. Пространственное разрешение при скорости судна около 16 км/ч составляло одно измерение на 300 м пути.

Общие синоптические процессы над регионом анализировались с помощью программы Digital Atmosphere (www.weathergraphics.com). Проводился также анализ прямых траекторий движения воздушных масс с использованием модели HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model, National Oceanic and Atmospheric Administration). Рассматривались траектории на трех высотных уровнях – 150, 250 и 500 м.

Результаты

На рис. 1 представлен пример регистрации высоких концентраций SO_2 , связанных с переносом шлейфа ТЭЦ над станцией Листвянка в ночь с 22 на 23 января 2013 г. Видно, что в течение дня 22 января при северо-западном ветре (со стороны Иркутска) около 2 м/с концентрации диоксида серы составляли около 50 мкг/м^3 . После захода солнца, около 19 ч местного времени, концентрации SO_2 стали быстро увеличиваться. При этом скорость ветра возросла до 10 м/с, а направление его стабилизи-

ровалось около $320\text{--}330^\circ$. К полуночи концентрации диоксида серы достигали в среднем $400\text{--}600 \text{ мкг/м}^3$, в отдельные моменты – до 1000 мкг/м^3 и более.

Столь высокие концентрации SO_2 , достигающие двух максимально разовых ПДК, при скоростях ветра 10 м/с указывают на то, что, скорее всего, это шлейф выбросов некой мощной ТЭЦ. Большая скорость ветра и стабильность его направления (рис. 1) в период максимальных концентраций SO_2 дают основание предполагать, что этот перенос связан с образованием метеорологического феномена, известного в литературе как «струйное течение низкого уровня», или «ночная струя» [1], хотя для более определенных выводов необходимо проведение радиозондирования в этом районе. К полудню следующего дня скорость ветра упала, направление стало переменным, и концентрации снизились с сотен до единиц мкг/м^3 . Приблизненные оценки количества ночного переноса SO_2 (при средних за ночь концентрациях 300 мкг/м^3 и скорости ветра 8 м/с) на Южный Байкал через единицу площади в час дают следующие результаты:

$$Q = C_{\text{SO}_2} \cdot V = 300 \text{ мкг/м}^3 \cdot 8 \text{ м/с} = \sim 10 \text{ г/(м}^2 \cdot \text{ч)}.$$

Если принять площадь сечения шлейфа от 0,1 до $0,5 \text{ км}^2$ (более точных данных, к сожалению, нет), то за 10 ч ночного переноса, показанного на рис. 1, в атмосферу Южного Байкала может поступить от 1 до 5 т диоксида серы. Реальность полученных оценок можно проверить, сравнив их с эмиссией SO_2 ближайшей крупной ТЭЦ – Ново-Иркутской. Средняя эмиссия SO_2 этой ТЭЦ составляет около 800 г/с , что дает около 3 т SO_2 в час или 30 т за 10 ч. Таким образом, благодаря ночным воздушным течениям на верхней границе ПСА на Южный Байкал может переноситься до 10–15% выбросов Иркутской ТЭЦ. Эмиссия Ангарских ТЭЦ примерно в 4–5 раз выше, чем Иркутской, и их вклад в загрязнение атмосферы Байкала может быть еще больше.

Наблюдения на одной станции не позволяют адекватно оценить частоту таких переносов и их пространственные масштабы. Средние месячные концентрации SO_2 в районе Листвянки составляют по многолетним данным 10–15 мкг/м^3 зимой и 3–4 мкг/м^3 летом. Поэтому вклад «струйных» переносов окислов серы и азота в среднем за год выглядит незначительным. Однако весьма вероятно, что станция Листвянка фиксирует только шлейфы, проносящиеся над самой станцией, и не фиксирует шлейфы, которые переносятся в стороне от станции или выше нее. Наблюдения, проведенные с борта НИС летом, показывают, что поперечные размеры таких шлейфов ограничены несколькими километрами [6].

Летние концентрации в среднем в несколько раз ниже зимних. Тем не менее ночные «струйные» переносы загрязнений возможны и в летнее время (рис. 2), но концентрации SO_2 в них намного ниже, в основном из-за меньшей эмиссии летом, но возможно и из-за более высокой границы ПСА и, соответственно, большей высоты переноса шлейфов.

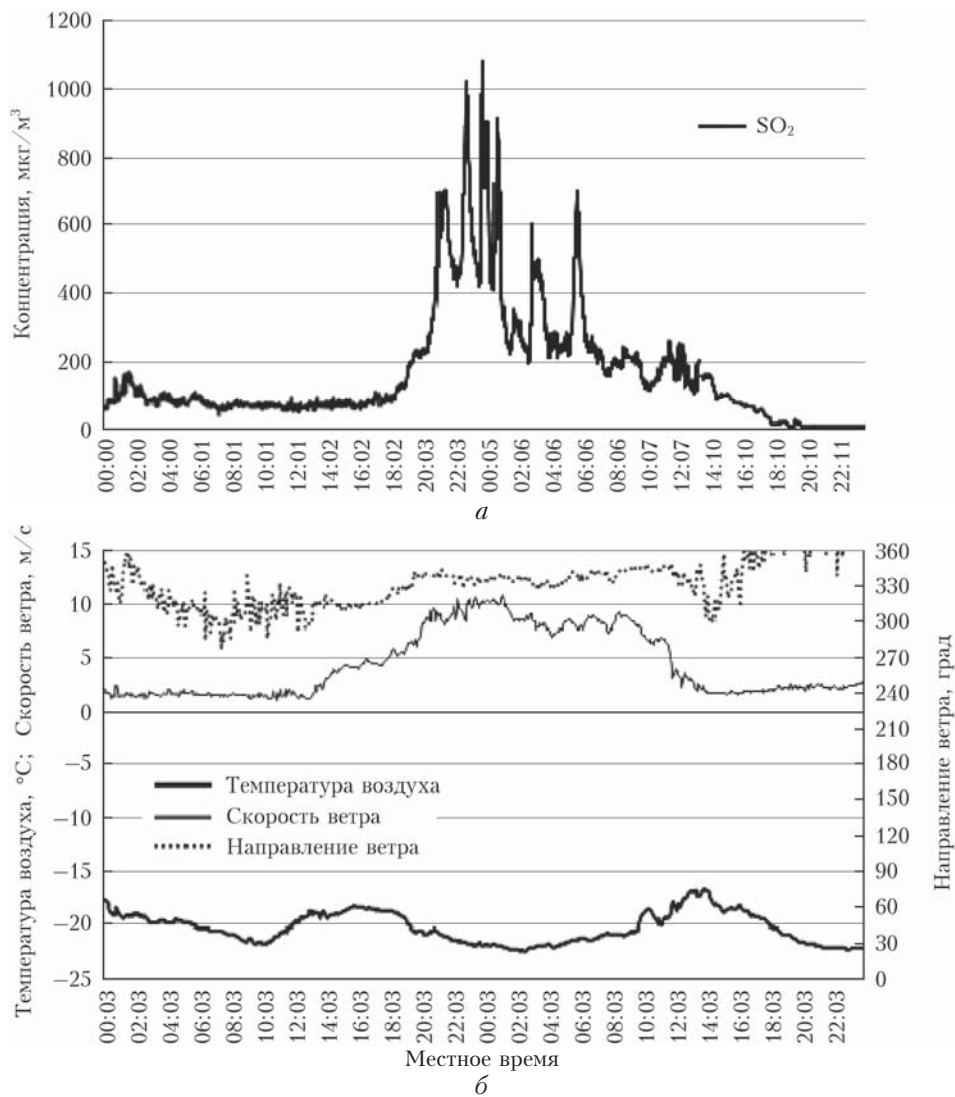


Рис. 1. Пример ночного переноса шлейфа ТЭЦ над ст. Листвянка 22–23 января 2013 г.: а – концентрация SO₂; б – метеорологические характеристики

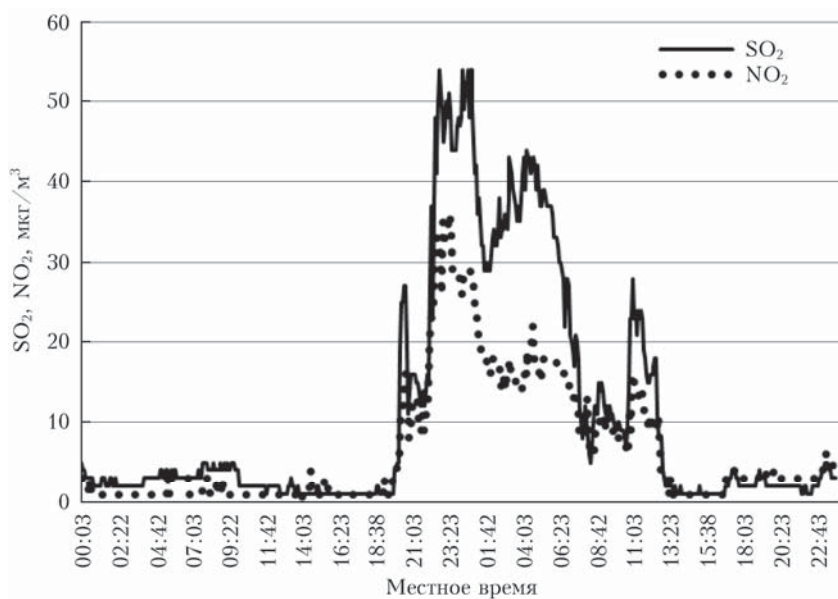


Рис. 2. Концентрации SO₂ и NO₂ на ст. Листвянка 7–8 июня 2013 г.

Возможный вклад крупных ТЭЦ Бурятии в загрязнение атмосферы Байкала до сих пор остается недостаточно изученным. За все время существования ст. Листвянка не было зафиксировано случаев переноса окислов серы и азота со стороны Бурятии в район расположения станции. Поэтому можно считать, что они, по крайней мере, не достигают западного побережья озера. Однако, как показали маршрутные наблюдения с борта НИС, случаи заноса SO_2 со стороны Бурятии возможны в районы восточного побережья озера. Один такой случай был зарегистрирован 24 июля 2014 г. (рис. 3). Съемка была проведена с борта НИС «Папанин» по круговому маршруту: пос. Большие Коты – м. Толстый (вдоль западного берега) – г. Бабушкин – дельта р. Селенги (восточное побережье).

На всем протяжении маршрута вдоль западного берега – от пос. Большие Коты до м. Толстый – концентрации SO_2 находились в пределах $5\text{--}10\text{ мкг/м}^3$. От м. Толстый при движении в сторону восточного берега концентрации диоксида серы начали постепенно увеличиваться и достигли на траверсе г. Бабушкин 200 мкг/м^3 (местами и более). Эти высокие концентрации сохранялись до дельты р. Селенга, в районе которой концентрации диоксида серы резко упали до $1\text{--}3\text{ мкг/м}^3$. Таким образом, обнаруженное облако загрязнения имело резкие границы на севере в районе Селенги и размытые, неопределенные границы на юго-западе. Судя по полю ветра (рис. 3), вынос загрязнения происходил из долины Селенги на озеро и затем встречным северо-восточным ветром рассеивался вдоль юго-восточного побережья Южного Байкала, в основном накапливаясь в зоне затишья – в районе г. Бабушкин. При этом концентрации окислов азота (NO , NO_2) на всем протяжении маршрута оставались на уровне фоно-

вых значений ($3\text{--}10\text{ мкг/м}^3$), хотя обычно их концентрации возрастают синхронно с концентрациями SO_2 (рис. 2). Известно, что газообразные окислы азота обычно трансформируются в нитраты быстрее, чем диоксид серы [7], поэтому их отсутствие при высоких концентрациях последнего может означать, что обнаруженное облако загрязнения SO_2 у восточного берега, возможно, копилось достаточно долгое время (несколько часов) и газообразные окислы азота успели окислиться до нитратов.

Анализ прямых траекторий движения воздушных масс от трех наиболее крупных антропогенных источников Бурятии – Селенгинска, Улан-Удэ и Гусиноозёрска – также указывает на то, что образование облака загрязнения у юго-восточного побережья Байкала связано, скорее всего, именно с этими источниками.

С целью анализа возможных механизмов и источников переноса диоксида серы на Южный Байкал от основных региональных источников были проведены также численные эксперименты с помощью математической модели переноса диоксида серы [8]. Область моделирования составляла по площади $250 \times 210\text{ км}^2$, по высоте 4 км. Шаг по вертикали задавался следующим образом: до высоты 200 м он равнялся 50 м, затем до высоты 500 м – 100 м, далее – 500 м, 1000 и 2000 м. Шаги по времени и горизонтали составляли 150 с и 1 км соответственно. Коэффициенты турбулентной диффузии рассчитывались с использованием соотношений полуэмпирической теории турбулентности. Модель применялась ранее при изучении процессов распространения и трансформации аэрозолей и газовых примесей в регионе Южного Байкала [6, 8–13]. Информация об интенсивности источников выбросов была взята из [5, 14].

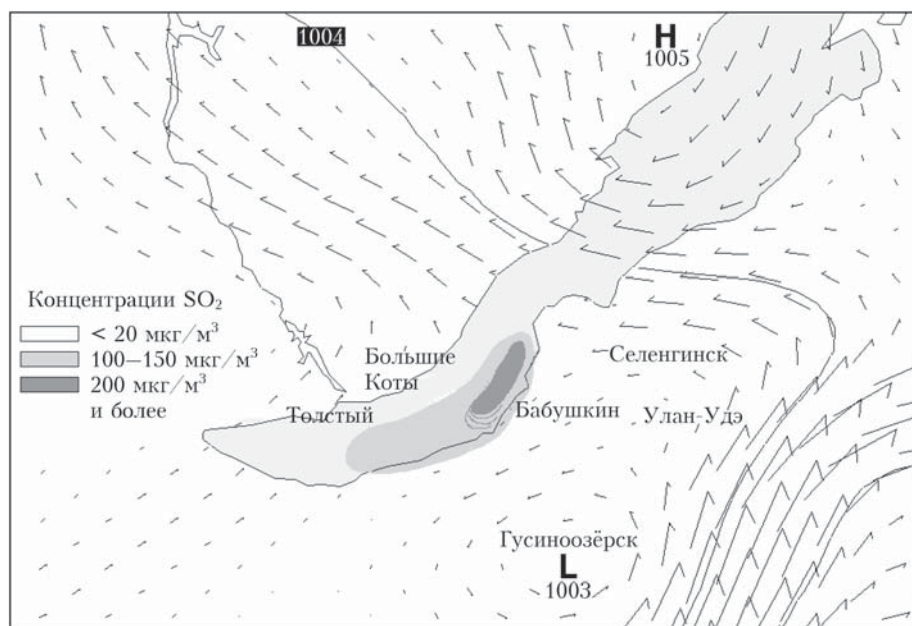


Рис. 3. Пространственное распределение концентраций SO_2 в атмосфере Южного Байкала 24 июля 2014 г. и поле геострофического ветра накануне измерений

Первая серия численных экспериментов проводилась для однородных (средних) метеорологических условий. Расчеты выполнялись отдельно для каждой группы источников: Иркутско-Черемховского промышленного узла (ИЧПУ), Слюдянки и Байкальска, Каменска и Селенгинска, Гусиноозёрской ГРЭС. В результате численных экспериментов получены следующие результаты. При северо-западном ветре скоростью 2 м/с источники ИЧПУ создают концентрации диоксида серы над западным берегом озера до 10 мкг/м^3 — с учетом влияния рельефа, и до 40 мкг/м^3 — без учета рельефа. Источники Слюдянки и Байкальска при западном ветре скоростью 2 м/с могут создавать концентрации SO_2 вблизи юго-восточного побережья около 5 мкг/м^3 . Расчетные концентрации диоксида серы в районе восточного побережья, при выносе со стороны источников в долине р. Селенги, с учетом влияния рельефа составили не более 3 мкг/м^3 , без влияния рельефа — $7\text{--}10 \text{ мкг/м}^3$.

Вторая серия численных расчетов была проведена при наличии инверсионного слоя в направлении распространения дымовых факелов. Источники выбросов располагались в инверсионном слое высотой 100 м, дымовые факелы задавались узкими, линейными [1]. Результаты расчетов показали, что при наличии инверсионного слоя в долине Ангары концентрации диоксида серы, создаваемые источниками ИЧПУ, могут достигать 150 мкг/м^3 и более именно у восточного берега Байкала, там, где 24.07 наблюдались большие (200 мкг/м^3) концентрации (рис. 3). Концентрации SO_2 от Слюдянки и Байкальска у восточного берега Байкала получались значительно ниже — не более 2 мкг/м^3 , вклад Каменска и Селенгинска составил до 20 мкг/м^3 .

Таким образом, моделирование переноса примесей в однородных метеорологических (без учета стратификации в ПСА) дает оценки концентраций SO_2 над озером, близкие к средним месячным измеренным концентрациям, но не отражает некоторые особые случаи переноса, в частности высотные переносы шлейфов ТЭЦ. Модельные оценки были более близки к измеренным концентрациям в случае численных экспериментов с переносами дымовых шлейфов в условиях инверсионной стратификации.

Заключение

Перенос атмосферных загрязнений на Южный Байкал может происходить как со стороны Иркутско-Ангарских ТЭЦ, так и со стороны крупных ТЭЦ в долине р. Селенги (Улан-Удэ, Гусиноозёрск и др.). Влияние местных ТЭЦ (Слюдянка, Байкальск) ограничивается прилегающими районами и практически не распространяется на остальную часть Южного Байкала.

Интенсивность переноса атмосферных загрязнений на Байкал от крупных региональных ТЭЦ сильно зависит от конкретных метеорологических условий в пограничном слое атмосферы, которые весьма изменчивы в течение суток и от сезона к сезону. Наиболее сильный перенос атмосферных

выбросов предприятий энергетики на Байкал происходит со стороны угольных ТЭЦ в районе Иркутска и Ангарска. Перенос происходит главным образом в виде слабо рассеянных шлейфов в процессах атмосферных струйных течений на высотах от 300 до 1000 м. Пространственные масштабы таких переносов (в частности, их дальность) нуждаются в дополнительном исследовании.

Работа поддержана проектом VIII.76.1.5 «Изменения абиотических и биотических характеристик озера Байкал под влиянием природных и антропогенных факторов» и проектом «Разработка основных положений стратегии экологически чистого энерго- и топливоснабжения потребителей центральной экологической зоны Байкальской природной территории» Сибирского отделения РАН.

1. Берлянд М.Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1985. 272 с.
2. Monti Y., Fernando H.J., Princevac M., Chan W.C., Kowalewski T.A., Pardjak E.R. Observations of flow and turbulence in the nocturnal boundary layer over a slope // J. Atmos. Sci. 2002. V. 59, N 13. P. 2513–2534.
3. Obolkin V.A., Potemkin V.L., Makukhin V.L., Chipanina Y.V., Marinayte I.I. Low-level atmospheric jets as main mechanism of long-range transport of power plant plumes in the Lake Baikal Region // Int. J. Environ. Studies. 2014. V. 71, iss. 3. P. 391–397. DOI: 10.1080/00207233.2014.918396.
4. Зуев В.Е., Антонович В.В., Белан Б.Д., Жбанов Э.Ф., Микушев М.К., Панченко М.В., Поданев А.В., Толмачев Г.Н., Щербатова А.В. Феномен круговой циркуляции в котловине озера Байкал // Докл. АН. 1992. Т. 325, № 6. С. 1146.
5. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Иркутской области в 2012 году». Иркутск: Изд-во ИГ им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2013. 337 с.
6. Оболкин В.А., Потемкин В.Л., Макухин В.Л., Чипанина Е.В., Маринайте И.И. Особенности пространственного распределения диоксида серы в Прибайкалье по данным маршрутных измерений и численных экспериментов // Метеорол. и гидрол. 2014. № 12. С. 35–41.
7. Cocks A.T., Kallend A.S., Marsh A.R.W. Dispersion limitations of oxidation in power plant plumes during long-range transport // Nature (Gr. Brit.). 1983. V. 305, N 5930. P. 122–123.
8. Аргучинцев В.К., Макухин В.Л. Математическое моделирование распространения аэрозолей и газовых примесей в пограничном слое атмосферы // Оптика атмосф. и океана. 1996. Т. 9, № 6. С. 804–814.
9. Макухин В.Л., Оболкин В.А., Потемкин В.Л. Экстремальные случаи переноса газовых примесей в атмосфере Прибайкалья в зимний период // Биосфера. 2014. Т. 6, № 4. С. 352–358.
10. Макухин В.Л., Потемкин В.Л. Моделирование переноса и трансформации загрязняющих примесей, в том числе ртути, на акватории оз. Байкал // Биосфера. 2012. Т. 4, № 3. С. 286–292.
11. Потемкин В.Л., Макухин В.Л., Гусева Е.А. Исследование процессов переноса и осаждения ртутьсодержащих веществ в атмосфере Южного Прибайкалья // Оптика атмосф. и океана. 2011. Т. 24, № 10. С. 906–909.
12. Тимофеева С.С., Седов Д.В., Макухин В.Л., Малыхин А.В. Загрязнение атмосферы залповыми выбросами при пожарах и авариях на промышленных объектах

Байкальского региона: оценка, прогноз, превентивные меры. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2009. 192 с.

13. *Оболкин В.А., Потемкин В.Л., Ходжер Т.В., Голобокова Л.П., Филиппова У.Г., Макухин В.Л., Toda К., Такеучи М., Обата Т., Хирота К.* Динамика серосодержащих примесей в атмосфере вокруг точечного источника – Байкальского целлюлозно-бумажного комбината (юго-восточное побережье оз. Байкал) // Оптика атмосф. и океана. 2009. Т. 22, № 9. С. 853–858; *Obolkin V.A., Potemkin V.L., Khodzher T.V., Golobokova L.P., Filippova U.G., Makukhin V.L., Toda K., Takeuchi M., Obata T., Khirota K.*

Obolkin V.A., Potemkin V.L., Makukhin V.L., Toda K., Takeuchi M., Obata T., Khirota K. Dynamics of sulfur – containing admixtures in the atmosphere around a point source – the Baikal pulp and paper plant on the southeast coast of Lake Baikal // Atmos. Ocean. Opt. 2010. V. 23, N 1. P. 32–38.

14. *Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Иркутской области в 2013 году».* Иркутск: Изд-во ИГ им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2014. 389 с.

V.A. Obolkin, V.L. Potemkin, V.L. Makukhin, T.V. Khodzher, E.V. Chipanina. Far transfer of trails, ejected by regional electric power stations to the South Baikal water area.

In the article, evidences of really observed regional transport of air pollutants onto Lake Baikal are compared with calculations with the use of mathematical model. According to observed data the highest air pollution over the lake is connected with atmospheric transport of sulphur and nitrogen dioxides from largest coal Power Plants situated around Irkutsk and Angarsk cities as well as from the side of Buryatia (Ulan-Ude and Gusinozersk). Particularly strong transport of sulphur and nitrogen dioxides into Baikal atmosphere happens at a night time, due to inversed meteorological condition, with weakly dispersed plumes from high stacks of Power Plants. Data of automatic measurements of sulphur and nitrogen dioxides demonstrate that real mechanisms of pollutant's transfer on the Lake Baikal are more complicated and varied as compared with simulated results. Simulated estimations of SO₂ concentrations are close to month average observed concentrations, but they do not describe some special events of extremely high concentrations of pollutants in Baikal atmosphere.