

МЕЗОМАСШТАБНЫЕ ПРОЦЕССЫ ПЕРЕНОСА АТМОСФЕРНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ В РАЙОНЕ ЮЖНОГО БАЙКАЛА

Оболкин В.А.¹, Шаманский Ю.В.², Ходжер Т.В.¹, Фалиц А.В.³

¹ *Лимнологический институт СО РАН, г. Иркутск, 664033, Россия
e-mail: obolkin@lin.irk.ru*

² *Иркутский гос. университет, г. Иркутск, 664033, Россия
e-mail: suv47@mail.ru*

³ *Институт оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН, г. Томск, Россия
e-mail: falits@iao.ru*

Статья поступила в редакцию 13.03.2019, одобрена к печати 08.07.2019

В статье рассматриваются результаты экспериментальных исследований мезомасштабных процессов переноса атмосферных загрязнений на Южный Байкал в системе низкоуровневых атмосферных струйных течений в пограничном слое атмосферы на высотах 100–600 м. Показано, что шлейфы атмосферных выбросов крупных угольных ТЭЦ могут захватываться струйными течениями и переноситься на сотни километров без существенного рассеяния и осаждения. Такие случаи наблюдаются, как правило, в ночные часы и чаще в холодном сезоне года. Основными загрязнителями в таких шлейфах являются диоксиды серы и азота, концентрации которых в районе Байкала (70 км от источников) могут достигать уровня ПДК и более. В процессе переноса оксиды азота частично окисляются атмосферным озоном до нитратов (преимущественно до азотной кислоты), при этом концентрации озона в зоне шлейфов опускаются до нуля, полностью расходуясь на окисление.

Ключевые слова: струйные течения низкого уровня, перенос атмосферных загрязнений, Южный Байкал

Введение

Мезомасштабные процессы в атмосфере (как и в гидросфере) играют чрезвычайно важную роль в процессах переноса вещества и энергии. В то же время экспериментальные исследования и математическое моделирование процессов этого масштаба крайне сложны, так как требуют высокого пространственно-временного разрешения на дистанциях в несколько десятков километров по горизонтали и сотни метров по вертикали. В частности, для южной части озера Байкал до сих пор спорным остается вопрос о возможном вкладе крупных промышленных центров Иркутской области и Бурятии в загрязнение природы озера через атмосферу. В последние годы, благодаря развитию и внедрению высокоразрешающих автоматических и дистанционных методов контроля атмосферных загрязнений и метеорологических параметров, удастся получать качественно новые данные о мезомасштабных процессах переноса атмосферных примесей от региональных

источников в реальном масштабе времени. Это позволяет также отслеживать химические трансформации загрязняющих примесей в процессах их региональных переносов. К явлениям такого масштаба относятся известные, но до сих пор малоизученные атмосферные струйные течения низкого уровня. Возникают они обычно в ночные и утренние часы (поэтому второе название – «ночные струи») на верхней границе пограничного слоя атмосферы: как над сушей, так и над водными акваториями (Angeas et al., 2000; Ну, 2013; Берлянд, 1985). Первые наблюдения мезомасштабных струйных переносов атмосферных загрязнений на Байкал были получены в ходе маршрутных измерений с борта научно-исследовательского судна при движении его по маршруту г. Иркутск–Южный Байкал (Оболкин и др., 2014). Вертикальная структура атмосферных струйных течений на Байкале впоследствии была исследована лидарными методами (Banakh, Smalikho, 2016). К настоящему времени накоплен уже значительный объем круглогодичных экспериментальных данных о различных особенностях этих процессов в исследуемом регионе.

В данной статье рассматриваются конкретные случаи мезомасштабных региональных переносов основных загрязняющих примесей на Южный Байкал со стороны Иркутска (70 км от озера) в различные сезоны года, а также возможные химические трансформации некоторых примесей в процессе переноса.

Район исследований и методы

Ключевое значение для дальности переноса атмосферных загрязнений имеет высота их выбросов. Наибольшей мощностью и высотой выбросов обладают крупные угольные ТЭЦ, имеющие высокие (до 200 м) трубы. С учетом подъема нагретых газов выбросы ТЭЦ могут достигать 300–400 м. На таких высотах метеоусловия сильно отличаются от приземных. В связи с этим, для наблюдений за переносами атмосферных загрязнений в районе Байкала удачным оказалось размещение пункта мониторинга («Листвянка») на вершине прибрежного холма (250 м над уровнем озера) – то есть максимально близко к уровню ночного пограничного слоя атмосферы. Пункт наблюдений располагается на территории Астрофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН, за пределами пос. Листвянка (рис. 1). Это позволило избегать влияния локальных прибрежных источников поселка и отслеживать региональный перенос загрязнений. Учитывая наличие вокруг городов Иркутск и Ангарск нескольких крупнейших региональных угольных ТЭЦ, можно ожидать, что их влияние на Байкал через атмосферу может быть связано в основном с переносами оксидов серы и азота на высотах порядка 500 м. Суммарные выбросы этих веществ городами Иркутск и Ангарск составляют около 200 тыс. тонн в год, что сравнимо с годовыми выбросами отдельных европейских стран.

Для измерений концентраций атмосферных загрязнений в пункте мониторинга «Листвянка» применялись автоматические газоанализаторы производства «ОПТЭК», Санкт-Петербург: А-310 (для оксидов азота) и С310 (для диоксида серы), с временным разрешением 1–2 мин, разрешение по концент-



Рис. 1. Место проведения мониторинга атмосферных загрязнений и лидарных измерений ветра на территории Байкальской астрофизической обсерватории.

рации 1 мкг/м^3 . Метеорологические измерения в приземном слое проводились с использованием ультразвуковой метеостанции «Метео-2М» разработки Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН (ИОА СО РАН), г. Томск. Кроме того, институт Оптике атмосферы периодически в летнее время проводил измерения высотных профилей скорости и направления ветра с помощью когерентного доплеровского ветрового лидара Stream Line (<http://www.halo-photonics.com/>) с целью исследования турбулентного волнового взаимодействия в пограничном слое атмосферы. Расположение когерентного доплеровского ветрового лидара Stream Line и схема его работы представлены на рис.1.

Результаты и их обсуждение

Пример высотного профиля скорости и направления ветра в ночном струйном течении над пунктом мониторинга «Листвянка», полученного с помощью измерений когерентным доплеровским лидаром, показан на рис. 2, за 14–15 августа 2015 г.

Из рис. 2 хорошо видно возникновение после полуночи (01:30 местного времени) струйного воздушного течения со скоростями до 20 м/сек, охватывающего высоты от 200 до 600 м над поверхностью земли. Затем, через 2–3 часа, высота струйного течения снизилась до 300 м, а скорость упала до 12 м/сек. Не исключено, что это ослабление струи было связано с отклонением ее (по направлению) относительно пункта наблюдения: вначале преобладало направление около 300° , затем направление менялось от 270° до 360° , иногда с переходом через 0° . Возможно, струя просто уходила из зоны измерения лидара. В приземном слое скорости ветра в это время были не столь значительными – до 6 м/сек (рис. 3).

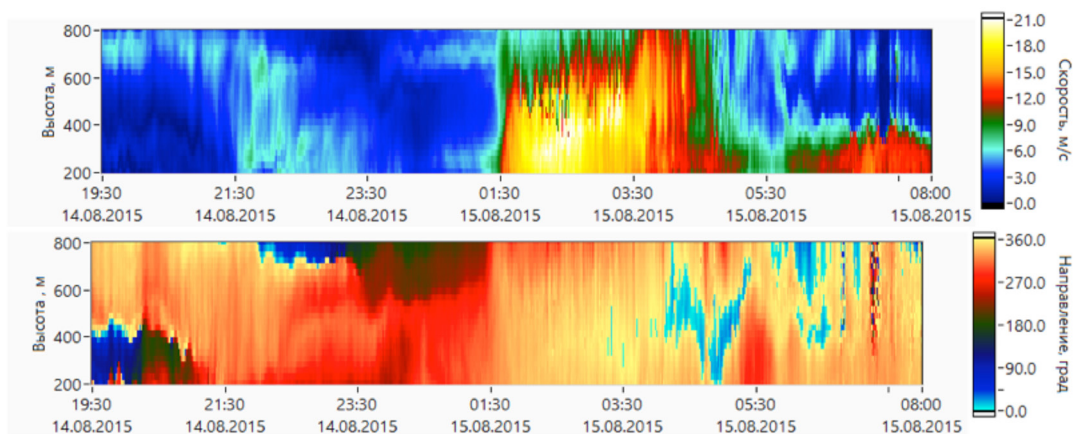


Рис. 2. Динамика высотного профиля скорости и направления ветра при возникновении струйного течения, по измерениям лидаром Stream Line в ночь с 14 по 15 августа 2015 г.

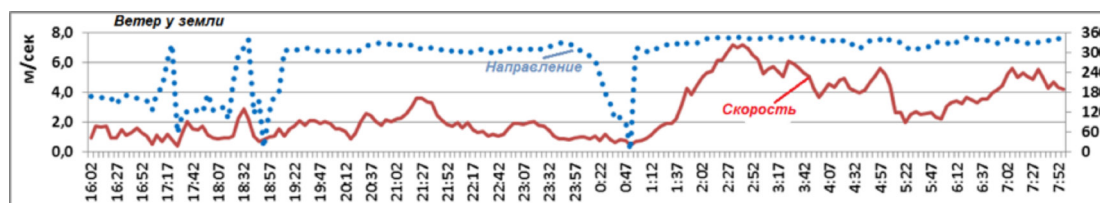


Рис. 3. Скорость и направление ветра в ночь с 14 по 15 августа 2015 г. по данным наземной метеостанции.

Круглогодичные наблюдения за ветром и атмосферными загрязнениями в пункте мониторинга «Листвянка» показали, что большим скоростям ССЗ ветра (со стороны Иркутска), как правило, соответствуют высокие концентрации таких примесей, как SO_2 и NO_2 , основными источниками которых являются высокие трубы крупных угольные ТЭЦ. То есть шлейфы таких высоких источников могут захватываться низкоуровневыми струйными течениями и переноситься на десятки и сотни километров, в том числе в район Южного Байкала.

Чаще и продолжительнее ночные струйные течения в рассматриваемом районе наблюдаются в холодное время года, когда температурные инверсии в пограничном слое атмосферы наиболее сильны, а высота пограничного слоя минимальна. В качестве примера на рис. 4 приведен визуально зафиксированный случай переноса шлейфа ТЭЦ на Байкал со струйным течением, происходившем в ночь и утро 11.01.2014 г.

Как видно из графика на рис. 4, в течение ночи и первой половины дня концентрации SO_2 в пункте наблюдений на Байкале, в связи с переносом шлейфа (фото), были весьма высоки (100–200 мкг/м^3) и изменчивы. При этом СЗ ветер на уровне пункта наблюдений (вершина холма) имел стабильное направление и скорость 5–6 м/сек, что указывает на струйный характер переноса. После полудня скорость ветра снизилась до 1–2 м/сек, а направление стало переменным и вскоре изменилось на обратное. Соответственно шлейф, по-видимому, изменил направление или рассеялся, так как концентрации SO_2 упали до нуля. На фото

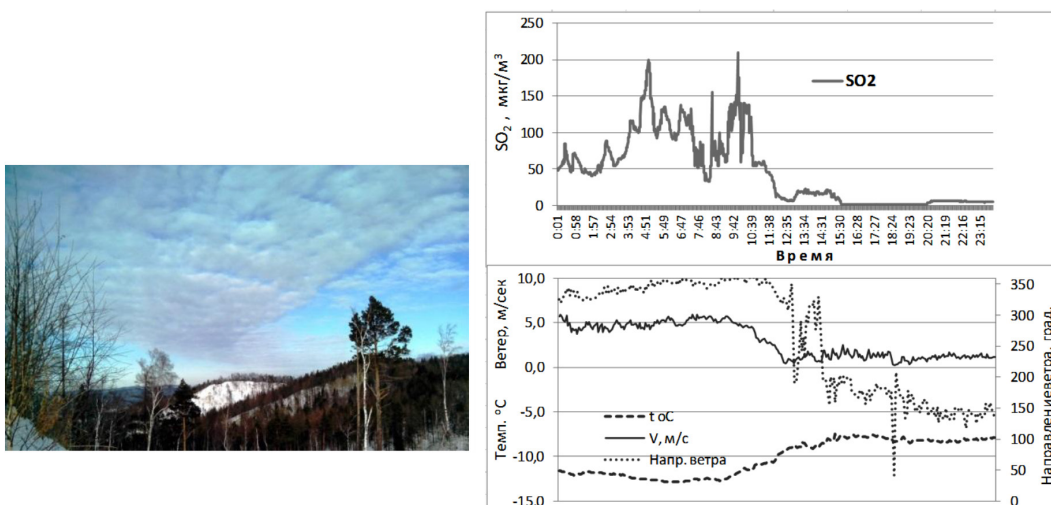


Рис. 4 . Слева – фото шлейфа удаленной ТЭЦ над районом Листвянки (70 км от Иркутска) в 10 ч утра 11.01.2014. Справа – концентрации SO₂ и метеоусловия на станции Листвянка в течение этого дня.

(рис. 4) видно, что шлейф проходит несколько выше пункта наблюдений и имеет извилистую форму. По-видимому, от положения шлейфа (струи) по отношению к пункту наблюдений зависят и величины концентрации примесей – чем ближе ось струи к пункту наблюдений, тем выше концентрации и скорость ветра. В течение зимы имели место случаи с концентрациями SO₂ более 1000 мкг/м³ и скоростями ветра более 10 м/сек.

Повторяемость таких переносов на Байкал соответственно связана с частотой северо-западных ветров по долине р. Ангары и соответствующих метеоусловий в пограничном слое атмосферы. Чаще всего струйные переносы случаются в декабре, когда поверхность озера еще не покрыта льдом, а температура воздуха в районе Иркутска уже значительно ниже нуля. Пример разной изменчивости средних суточных концентраций SO₂ в Листвянке для холодного декабря 2012 г. показан на рис. 5а, для теплого декабря 2013 г. – рис. 5б. Видно, что в холодном декабре наблюдалось 13 случаев с очень высокими суточными концентрациями диоксида серы (выше ПДК_{с.с.}). Как правило, они совпадают с повышенными скоростями СЗ ветра и низкими температурами воздуха и, скорее всего, со струйными переносами шлейфов ТЭЦ. В теплом декабре (рис. 5б) суточные концентрации SO₂ были значительно ниже и наблюдался только один случай превышения ПДК_{с.с.}, который также соответствовал высокой скорости СЗ ветра и понижению температуры.

Помимо диоксида серы в шлейфах угольных ТЭЦ, переносимых струйными течениями, содержится большое количество оксидов азота, которые вступают в реакцию с атмосферным озоном в первые часы после выбросов, еще над Иркутском (рис. 6), быстро окисляясь в процессе переноса до Байкала до нитратов, главным образом до HNO₃. Концентрация озона при этом в зоне шлейфа может упасть до нуля, полностью расходуясь на окисление. Как видно из рис. 6, в Иркутске наиболее высоки концентрации NO, особенно в часы пик (вечером и утром), на Байкале же NO практически отсутствует, зато концентрация NO₂ даже несколько

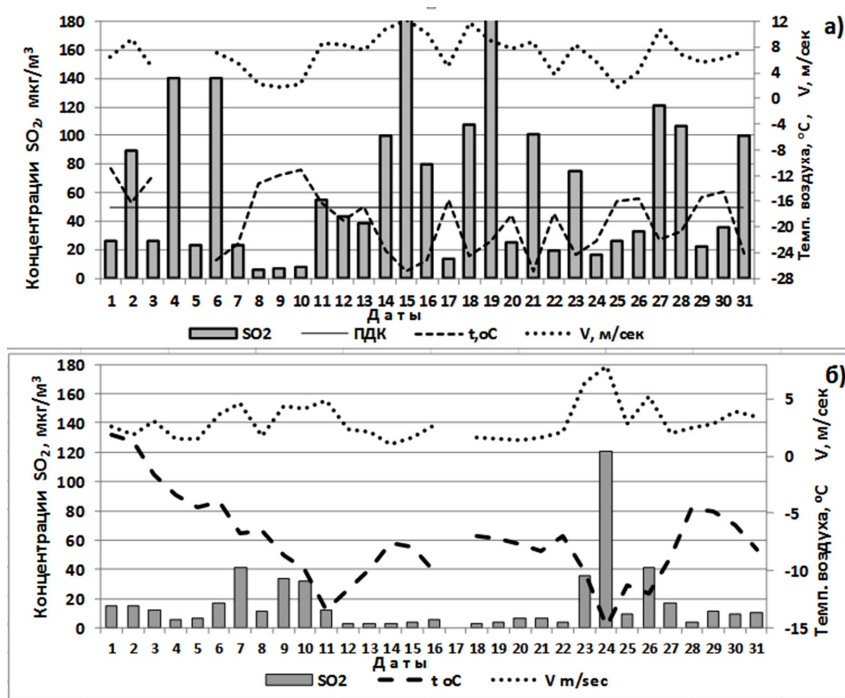


Рис. 5. Средние суточные концентрации SO_2 на станции Листвянка в холодном декабре 2012 г. – (а) и теплом декабре 2013 г. – (б).

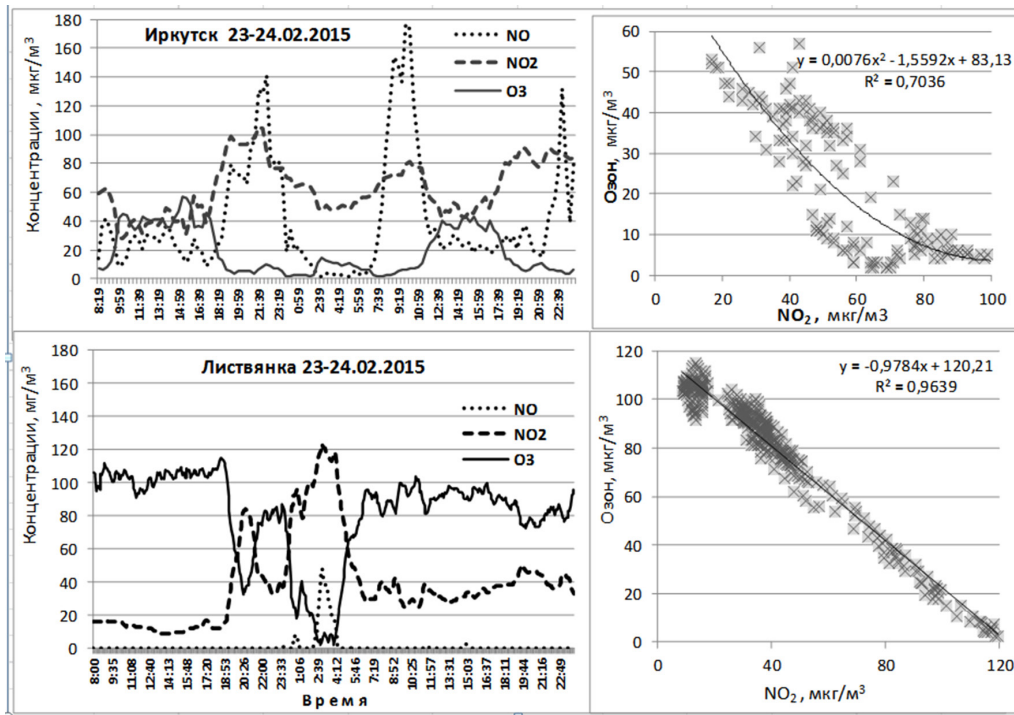


Рис. 6. Пример поглощения озона оксидами азота, переносимыми «ночной струей» в ночь 23–24 февраля 2015 г., в Иркутске (верхний рисунок) и Листвянке (нижний).

выше, чем в Иркутске, и достигает максимума в ночные часы. Из-за образующегося дефицита озона в зоне шлейфа окисление других примесей, в частности, SO_2 , затрудняется. В результате этих процессов на трассе переноса Иркутск–Южный

Байкал количество нитратов возрастает с удалением от городов-источников, в то время как окисление SO_2 до сульфатов не происходит и содержание последних в атмосфере с удалением от источников быстро уменьшается. Следствием этих процессов является повышенное выпадение HNO_3 в южной котловине озера, особенно на юго-восточном побережье – в районе Хамар-Дабана (Obolkin et al., 2016).

Следует отметить чрезвычайно высокую изменчивость концентрации примесей в пункте мониторинга, по-видимому, в связи с постоянным смещением оси струи по отношению к пункту наблюдений. Обычно на фоне преобладания сравнительно низких концентраций загрязнений периодически возникают очень высокие концентрации. С помощью графики трудно показать все многообразие временной изменчивости концентраций. Некоторое представление об этом может дать описательная статистика этой изменчивости, представленная в таблице. Видно, что самые высокие концентрации всех примесей отмечаются в Иркутске: в зимние месяцы преобладает NO , на втором месте NO_2 , на последнем – SO_2 (хотя выбросы диоксида серы, наоборот, максимальны). Это связано с тем, что выбросы SO_2 в городе практически целиком идут на высотах (трубы ТЭЦ), а оксиды азота частично связаны с низкими источниками – автотранспортом. Второе, что обращает на себя внимание, – высокая положительная асимметрия и эксцесс распределения (наибольшие для SO_2). Это означает, что осреднение по времени данных автоматических измерений правильнее будет производить геометрически – и действительно, геометрическое среднее, например, для SO_2 ниже арифметического примерно в 2 раза.

Таблица. Описательная статистика рядов автоматических данных о концентрациях NO , NO_2 , SO_2 в Иркутске и Листвянке. Mkg/m^3

	Иркутск						Листвянка					
	Зима ($n = 2200$)			Лето ($m = 1500$)			Зима ($n = 2000$)			Лето ($n = 1400$)		
	NO	NO_2	SO_2	NO	NO_2	SO_2	NO	NO_2	SO_2	NO	NO_2	SO_2
Среднее арифмет.	159	68	23	48	40	17	2	15	34	< 1	9.0	6.4
Среднее геометр.	149	58	13	26	36	7	< 1	7	13	< 1	8.1	4.9
Минимум	0	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
максимум	1350	273	293	580	138	215	170	140	1400	18	48	90
Асимметрия	2.4	1.5	3.5	2.6	1.4	4.2	–	1.7	1.8	–	1.3	1.3
Эксцесс	6.9	3.6	18.0	6.8	2.5	23.4	–	9.3	8	–	8.5	2.7

Совершенно другая ситуация – на станции Листвянка. Средние концентрации NO и зимой и летом близки к нулю, то есть влияние автотранспорта практически отсутствует (за исключением отдельных случаев – в максимуме 170 мкг/м^3). Средние концентрации NO_2 примерно в 2 раза ниже, чем в Иркутске, а средние концентрации SO_2 максимальны и примерно равны средним концентрациям в

Иркутске (в Листвянке даже несколько выше). Последнее указывает на возможный дальний перенос диоксида серы и на то, что происходит он на высотах (станция расположена на холме – около 200 м над уровнем Байкала). Присутствие NO_2 в атмосфере на станции Листвянка (при отсутствии NO) также говорит о его возможном дальнем переносе вместе с диоксидом серы (их соотношение в выбросах ТЭЦ и в атмосфере Листвянки достаточно близкое).

Тот факт, что средние концентрации диоксида серы в Иркутске и Листвянке примерно равны, указывает на то, что большая часть выбросов ТЭЦ выносится за пределы города и перенос их происходит при слабом рассеянии (в виде шлейфов). Дальние переносы шлейфов ТЭЦ с низкоуровневыми струйными течениями описаны и для других районов мира (Берлянд, 1985).

Выводы

Применение автоматических методов мониторинга атмосферных загрязнений и метеорологических параметров, благодаря их высокому временному разрешению, позволяет отслеживать процессы загрязнения воздуха в реальном масштабе времени. Их применение в Иркутске и на Байкале дало возможность получить ряд качественно новых представлений о процессах переноса атмосферных загрязнений на Южный Байкал со стороны региональных промышленных центров. В частности, анализ результатов автоматически измерений показывает:

– выбросы крупных региональных угольных ТЭЦ (SO_2 и NO_2) могут достигать Южного Байкала в виде узких слабо рассеивающихся шлейфов в процессах мезомасштабных струйных переносов в пограничном слое атмосферы, выбросы автотранспорта (в основном NO) окисляются и рассеиваются большей частью в пределах города и практически не достигают побережья Байкала;

– диоксид азота в атмосферных выбросах ТЭЦ в процессе дальнего переноса в пограничном слое атмосферы окисляется озоном до азотной кислоты, что приводит к закислению атмосферных выпадений на Южном Байкале и внесению дополнительных нитратов в экосистему прибрежных вод озера;

– диоксид серы (в отличие от диоксида азота) переносится в шлейфе ТЭЦ практически без трансформации (по крайней мере, на дистанции до Южного Байкала), поэтому он может оказывать только прямое токсическое воздействие на леса, так как его концентрации в шлейфах могут превышать соответствующие ПДК.

Работа выполнена в рамках темы госзадания ЛИН СО РАН № 0345-2019-0008 (АААА-А16-116122110065-4) «Оценка и прогноз экологического состояния озера Байкал и сопряженных территорий в условиях антропогенного воздействия и изменения климата», а также при поддержке гранта РФФИ «офи_м» № 17-29-05044.

Литература

- Берлянд М.Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 272 с.
- 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 // Метеорология и гидрология. 2014. № 12. С. 35–41.
- Anreas E.L., Claffey K.J., Makshtas A.P. Low level atmospheric jets and inversions over the western Weddell sea // *Boundary-Layer Meteorology*. 2000. Vol. 97. P. 459–486.
- Banakh V.A., Smalikho I.N. Lidar observations of atmospheric internal waves in the boundary layer of the atmosphere on the coast of Lake Baikal // *Atmos. Meas. Tech.* 2016. Vol. 9. P. 5239–5248. <https://doi.org/10.5194/amt-9-5239-2016>.
- Hu X.M., Klein P.M., Xue M., Lundquist J.K., Zhang F., Qi Y. Impact of low-level jets on nocturnal urban heart island intensity in Oklahoma city // *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 2013. Vol. 52. P. 1779–1802.
- Obolkin V., Khodzher T., Sorokovikova L., Tomberg I., Netsvetaeva O., Golobokova L. 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. P. 452–461.

MESOSCALE PROCESSES OF ATMOSPHERIC POLLUTANTS TRANSFER IN THE SOUTH BAIKAL REGION

Obolkin V.A.¹, Shamanskii Yu.V.², Khodzher T.V.¹, Falits A.V.³

¹ *Limnological Institute SB RAS, Irkutsk, 664033, Russia*
e-mail: obolkin@lin.irk.ru

² *Irkutsk State University, Irkutsk, 664033, Russia*
e-mail: suv47@mail.ru

³ *Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk, Russia*
e-mail: falits@iao.ru

Submitted 13.03.2019, accepted 08.07.2019

The article considers the results of experimental studies of mesoscale processes of atmospheric pollution transfer to the southern Baikal in the system of low-level atmospheric jet flows in the atmospheric boundary layer at heights up to 100–600 m. It is shown that the plumes of atmospheric emissions of large coal-fired power plants can be captured by the atmospheric jets and transferred to hundreds of kilometers without significant scattering and deposition. Such cases are observed, as a rule, at night and more often in the cold season of the year. The main pollutants in these plumes are sulfur dioxide and nitrous oxides, concentration of which in the region of Lake Baikal (70 km from the source) can reach the level from hundreds to thousands $\mu\text{g}/\text{m}^3$. In the process of transfer, nitrogen oxides are partially oxidized by atmospheric ozone to nitrates (mainly to nitric acid), while ozone concentrations in the plume zone drop to zero, completely depending on oxidation.

Keywords: low level atmospheric jets, atmospheric pollutants transfer, South Baikal

References

- Anreas E.L., Claffey K.J., and Makshtas A.P. Low level atmospheric jets and inversions over the western Weddell sea. *Boundary-Layer Meteorology*, 2000, Vol. 97, pp. 459–486.
- Banakh V.A. and Smalikho I.N. Lidar observations of atmospheric internal waves in the boundary layer of the atmosphere on the coast of Lake Baikal. *Atmos. Meas. Tech.*, Vol. 9, pp. 5239–5248, <https://doi.org/10.5194/amt-9-5239-2016>.
- Berlyand M.E. Prognoz i regulirovanie zagryazneniya atmosfery (The forecast and regulation of atmospheric pollution). Leningrad: Gidrometisdat, 1985, 272 p.
- Hu X.M., Klein P.M., Xue M., Lundquist J.K., Zhang F., and Qi Y. Impact of low-level jets on nocturnal urban heat island intensity in Oklahoma city. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2013, Vol. 52, pp. 1779–1802.
- Obolkin V., Khodzher T., Sorokovikova L., Tomberg I., Netsvetaeva O., and Golobokova L. 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.
- Obolkin V.A., Ptemkin V.L., Makukhin V.L., Chipanina E.V., and Marinayte I.I. Osobennosti prostranstvennogo raspredeleniya dioksida sery v Pribaikalye po dannym marshrutnykh izmerenii i chislennykh experimentov (Peculiarities of spatial distribution of sulphur dioxide in the Baikal region according to route measurements and numerical experiments). *Meteorologiya i gidrologiya*, 2014, Vol. 12, pp. 35–41.