

# ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ СЛУЧАИ ПЕРЕНОСА ГАЗОВЫХ ПРИМЕСЕЙ В АТМОСФЕРЕ ПРИБАЙКАЛЯ В ЗИМНИЙ ПЕРИОД

**В.Л. Макухин, В.А. Оболкин, В.Л. Потемкин**

Лимнологический институт СО РАН, Иркутск, Россия

Эл. почта: aerosol@lin.irk.ru

Статья поступила в редакцию 30.09.2014; принята к печати 17.10.2014

Рассмотрены результаты длительного атмосферного мониторинга оксидов серы и азота в районе пос. Листвянка (Южный Байкал). Показано, что основное поступление антропогенных примесей на юг озера связано с ветрами северо-западного направления в зимний период года (до 300 мкг/м<sup>3</sup> в пиковых концентрациях при средних значениях 30–40 мкг/м<sup>3</sup>). На станции мониторинга «Листвянка» наряду с региональным переносом примесей регистрируются кратковременные влияния местных источников, но их пространственные масштабы невелики. Описанные в статье экстремальные случаи изменения газового состава атмосферы происходят в северном полушарии постоянно в поздний осенний - ранний зимний периоды из-за возникновения больших термобарических градиентов между территориями, имеющими разную подстилающую поверхность (суша-озеро, гора-долина). Исследования подобных случаев на Байкале будут способствовать пониманию развития процессов распространения примесей в других регионах.

*Ключевые слова:* атмосферный перенос, окислы серы, окислы азота, мониторинг.

## EXTREME CASES OF TRANSFER OF GASEOUS POLLUTANTS IN THE ATMOSPHERE NEAR THE LAKE BAYKAL OCCUR IN WINTER

**V.L. Makukhin, V.A. Obolkin, V.L. Potiomkin**

Limnological Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Science, Irkutsk, Russia

E-mail: aerosol@lin.irk.ru

The results of a long-term monitoring of sulfur and nitrogen oxides at Listvianka Monitoring Station (South Baykal) suggest that anthropogenic pollutants enter the southern part of Baykal mainly in winter via northwest winds. The peak levels of the pollutants may be as high as 300 mg/m<sup>3</sup>, their mean levels being 30 to 40 mg/m<sup>3</sup>. Along with the trans-regional transfer of the pollutants, short-term high-level influences of air pollution caused by local sources are registered at Listvianka; however, the spatial scales of these cases cannot be large. Extreme cases of changes in the composition of atmospheric air occur in the Northern Hemisphere perpetually from late autumn to early winter because of high thermobaric gradients between territories having different surfaces (terrestrial vs. aqueous or hilly vs. plains). Investigating such cases at Baykal will be helpful in understanding the causes of pollutants spread in other regions.

*Keywords:* atmospheric transfer, sulfur oxides, nitrogen oxides, monitoring.

### Введение

Охране оз. Байкал, включая атмосферную среду над ним, уделяется большое внимание. Наибольшее беспокойство вызывает загрязнение воздушного бассейна над южной котловиной озера, где происходит перенос атмосферных выбросов не только от довольно значительных местных источников (таких как г. Байкальск, Слюдянка), но и от крупнейших региональных промышленных центров, в частности, Иркутска и Ангарска. В последние годы в ряде пунктов Байкальского региона начат регулярный мониторинг кислотных выпадений. Лимнологическим институтом СО РАН такие наблюдения ведутся уже более двадцати лет в Иркутске (52,3° с. ш., 104,4° в. д.) – одном из основных региональных источников антропогенной эмиссии, а также в районе пос. Листвянка (51,9° с. ш., 104,7° в. д.), расположенного на берегу оз. Байкал в 70 км к юго-востоку от Иркутска [1, 2, 18]. Такое расположение пунктов, а также регулярность наблюдений создают возможность для изучения атмосферных процессов, влияющих на перенос и трансформацию примесей на трассе Иркутск–Южный Байкал. Комплексные исследования процессов распространения и трансформации загрязняющих

веществ в атмосфере региона озера Байкал позволят дать рекомендации по улучшению экологии этого участка мирового природного наследия.

### Район и методы исследования

Поселок Листвянка расположен на северо-западном берегу Южного Байкала вблизи истока р. Ангара. Население поселка составляет 2,3 тыс. человек, промышленные предприятия со значительными выбросами отсутствуют. Основное влияние на загрязнение атмосферного воздуха оказывают предприятие жилищно-коммунального хозяйства, печное отопление частного жилого сектора и выбросы автотранспорта. По данным наблюдений, проводимых Иркутским УГМС (метеостанция «Исток Ангары» рядом с поселком) за состоянием загрязнения атмосферы, уровень загрязнения атмосферного воздуха в пос. Листвянка низкий. Среднегодовые концентрации основных загрязняющих примесей не превышали предельно допустимых норм. Максимальная концентрация взвешенных веществ достигала 1,2 ПДК, диоксида азота – 2 ПДК [3].

Станция мониторинга «Листвянка» расположена на территории Байкальской астрофизической

обсерватории Института солнечно-земной физики СО РАН, за пределами поселка (около 1 км от его юго-восточной окраины), на прибрежном хребте высотой около 200 м над уровнем озера (рис. 1). Здесь ведется комплекс наблюдений за кислотными выпадениями из атмосферы синхронно с метеорологическими измерениями. Такое расположение станции мониторинга позволяет вести наблюдения в зоне с уменьшенным влиянием локальных антропогенных источников, эффекты которых при измерениях на метеостанции ИУГМС существенны.

В данной работе рассматриваются результаты измерений концентраций диоксидов серы и азота, оксида азота, которые являются основными (первичными) источниками подкисления атмосферных осадков и аэрозольных примесей. Измерения проводились на станции мониторинга «Листвянка» и в Иркутске с помощью автоматических хемилюминесцентных газоанализаторов С-310 (для диоксида серы) и Р-310А (для оксидов азота) фирмы «ОПТЭК» (Санкт-Петербург), имеющих погрешность измерений в пределах 20%, чувствительность датчиков, позволяющую определять концентрации менее 1 мкг/м<sup>3</sup>. Регистрация велась на компьютере с временным разрешением 2 мин. Сравнение данных газоанализаторов с методами отбора на фильтры [22] показало их хорошее согласие. Метеорологические параметры (температура и влажность воздуха, атмосферное давление, скорость и направление ветра) измерялись согласно указаниям Росгидромета на высоте 2 м от поверхности земли с помощью ультразвукового метеорологического комплекса «МЕТЕО-2» с автоматизированным выводом данных на компьютер с осреднением 5 мин. Комплекс также позволяет оценивать параметры турбулентности воздуха. Используемая в работе аппаратура раз в год проходит поверку в соответствующих центрах.

Так как экспериментальные методы имеют определенные недостатки (недостаточное пространственное разрешение, неясность с источниками и факторами, влияющими на формирование наблюдаемых концентраций), в данном исследовании предлага-

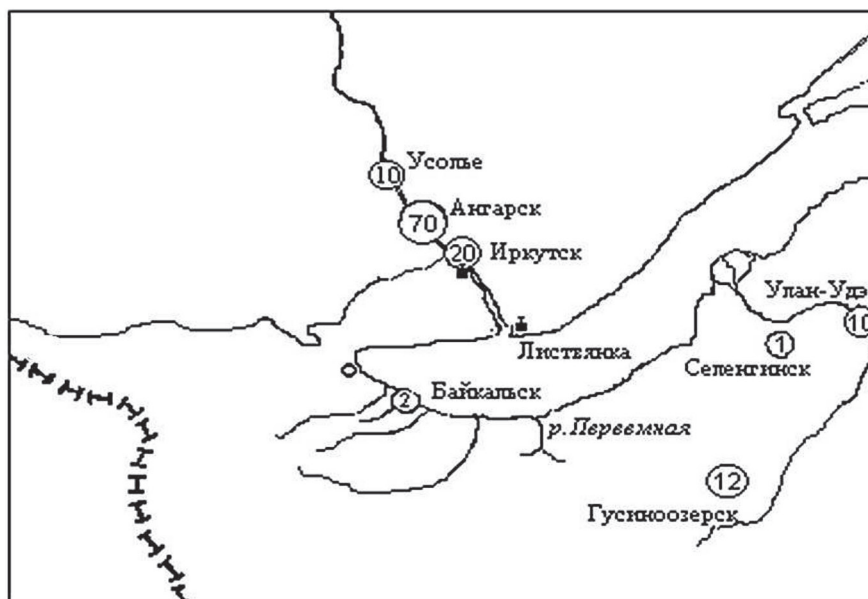
ются результаты расчетов по математической модели, основанной на численном решении трехмерного нелинейного нестационарного полуэмпирического уравнения турбулентной диффузии примесей [4,17].

### Результаты мониторинга и обсуждение

Измерения концентрации газовых примесей проводятся каждый сезон года попеременно в г. Иркутск и станции мониторинга «Листвянка» в течение 1–1,5 месяца непрерывно. После отбраковки (например, случаи сжигания мусора, отключение электричества) ряды наблюдений усредняются по каждому часу. Поэтому обычно длины непрерывных рядов наблюдений превышали 600–700 значений. Так как анализируемые характеристики не могут быть меньше нуля, распределение выборок отличается от нормального и имеет сильную асимметрию с коэффициентом более 2. Анализ данных показал, что концентрации оксидов серы и азота очень изменчивы, особенно в зимний период. В холодный период года значения концентраций этих веществ достигали 300 мкг/м<sup>3</sup>, чему способствует развитие температурных инверсий при установившемся Сибирском антициклоне (табл. 1, пример одной из реализаций приведен на рис. 2).

Следует отметить, что пик диоксида азота на рис. 2 мог быть вызван кратковременным выносом облака окислов азота с территории порта пос. Листвянка (выхлопы двигателей судов), расположенного на удалении 1–1,5 км от станции.

Анализ метеорологических условий показал, что большие концентрации диоксида серы в зимний период на станции мониторинга «Листвянка» совпадают по времени с усилением северо-западного ветра и похолоданием (рис. 3, анализируемый период 28.12.2005–04.01.2006). Временной ход концентрации SO<sub>2</sub> в этот период выглядит так, как будто облако антропогенных примесей, стоявшее над пос. Листвянка, под действием усилившегося воздушного потока северо-западного направления вбрасывается в район пункта мониторинга, расположенный с подветренной стороны поселка, а затем через несколько

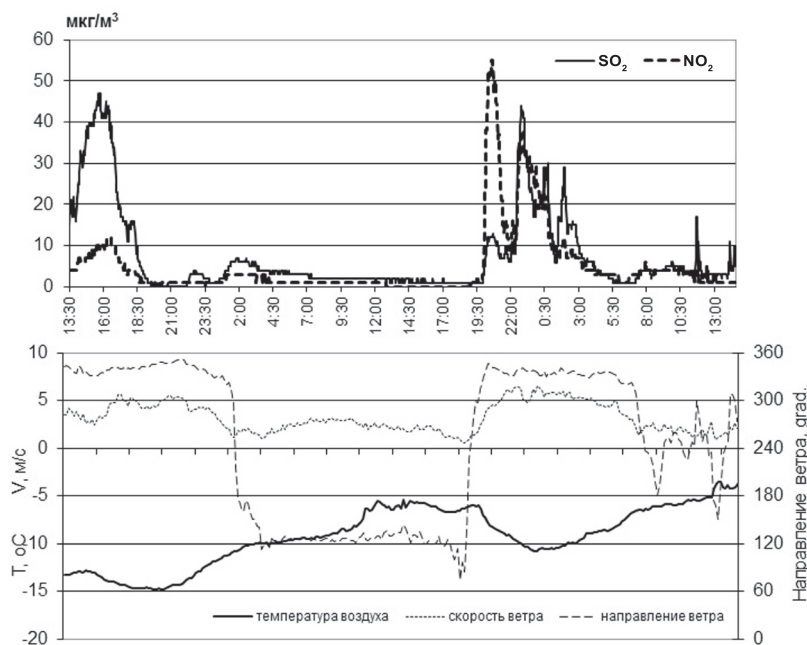


**Рис. 1.** Расположение станции мониторинга «Листвянка». Числа означают средние выбросы в атмосферу сернистого газа в тыс. тонн за год [3]

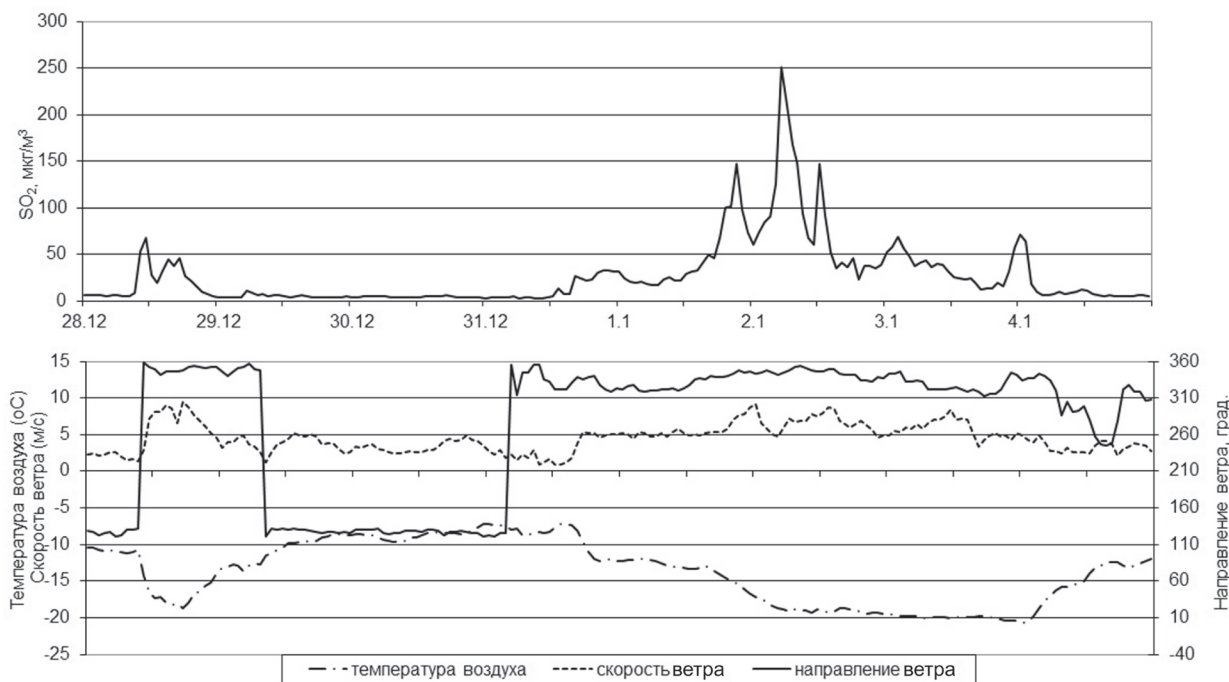
Табл. 1

**Основные статистические характеристики изменчивости концентраций SO<sub>2</sub>, NO и NO<sub>2</sub> (мкг/м<sup>3</sup>) в Иркутске и Листвянке**

Станция	Характеристика	SO <sub>2</sub>		NO		NO <sub>2</sub>	
		Зима	Лето	Зима	Лето	Зима	Лето
Иркутск	Среднее	26	9	24	4	38	16
	Максимум	190	70	200	80	72	84
	Минимум	0	0	0	0	9	4
	Ст. отклонение	28	8	38	10	13	12
Листвянка	Среднее	36	3	<1	<1	16	8
	Максимум	280	20	42	16	33	44
	Минимум	2	0	0	0	7	4
	Ст. отклонение	38	3	-	-	5	6



**Рис. 2.** Динамика концентрации SO<sub>2</sub> и NO<sub>2</sub> на станции мониторинга «Листвянка» за период 13–15.11.2007 г.



**Рис. 3.** Динамика концентрации SO<sub>2</sub> и метеорологические условия на станции мониторинга «Листвянка» за период 28.12.2005–04.01.2006 гг.

десятков минут облако рассеивается и концентрации становятся существенно меньше, но остаются более высокими, чем при других направлениях ветра. Континентальное положение озера, открытая водная поверхность в этот период (ледостав начинается в середине января) создают термобарический контраст между сушей и озером (в котловине озера воздух теплее на несколько градусов и давление ниже, чем над окружающими территориями), что приводит к постоянному возникновению северо-западного ветра, то есть перемещению холодных воздушных масс из Предбайкалья (Иркутского амфитеатра) в котловину озера вдоль долины р. Ангара. В этом случае температура воздуха может служить количественной характеристикой смены воздушной массы. Это подтверждается наличием отрицательной корреляции между содержанием диоксида серы и температурой воздуха ( $R = -0,54$  при  $\sigma_r = 0,04$ ), если считать постоянными действующие в регионе источники  $SO_2$ . Конечно, в общем случае концентрации диоксида серы в воздухе определяются эмиссией источников. На рис. 3 видно, что выборка концентраций диоксида серы имеет сильную правую асимметрию ( $As = 2,9$ ): среднее по выборке равно  $27 \text{ мкг/м}^3$  (при стандартном отклонении  $37 \text{ мкг/м}^3$ ), а мода – только  $4,8 \text{ мкг/м}^3$ , хотя стандартная ошибка среднего из-за большой длины ряда ( $n = 192$ ) равна  $2,7 \text{ мкг/м}^3$ . Похожее на это поведение диоксида серы наблюдается на станциях мониторинга ЕМЕР в Европе [20, 23].

При возникновении северо-западного переноса примеси от Иркутска должны регистрироваться в Листвянке с задержкой в несколько часов. Поэтому первый случай высоких концентраций (28.12.05 на рис. 3), скорее всего, связан с влиянием пос. Листвянка, потом сутки был юго-восточный ветер, принесший чистый воздух (концентрации  $SO_2$  были ме-

нее  $4 \text{ мкг/м}^3$ ), а второе повышение содержания  $SO_2$  (1.01.2006 г., после 16 часов), начавшееся с запаздыванием по отношению к началу северо-западного ветра (на 6–8 часов), вызван выбросами Иркутско-Ангарского промышленного узла. Небольшое повышение вечером 31.12.2005 г. при смене и ослаблении ветра также связано с локальным воздействием от поселка. Количественно разделить вклад местных и региональных источников по представленным выше данным пока затруднительно.

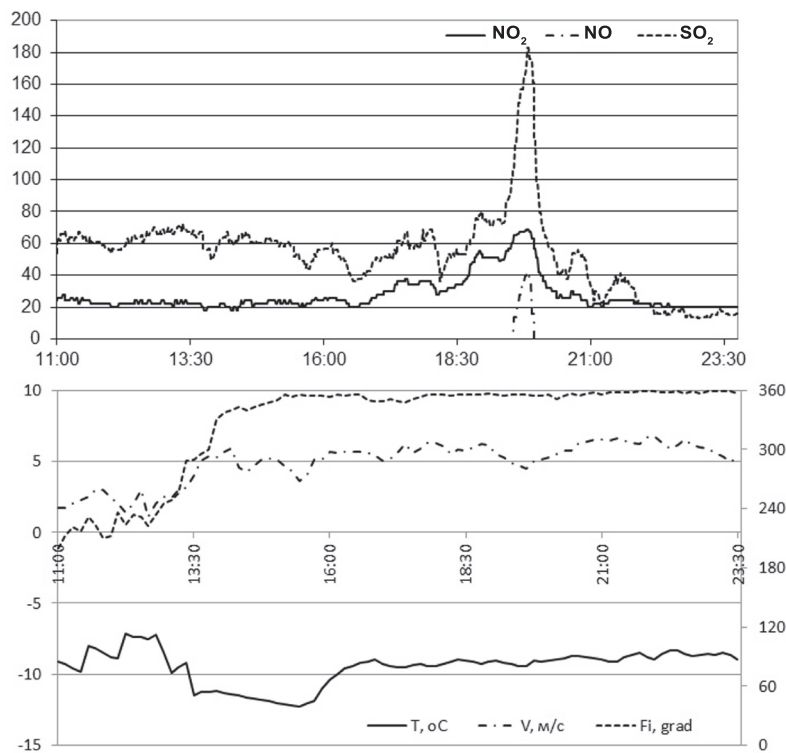
При направлении ветров со стороны Байкала, в том числе со стороны Байкальского ЦБК (в 70 км от Листвянки, на противоположном берегу озера), концентрации исследуемых примесей в зимний период намного ниже, чем со стороны суши (часть рис. 3 за 30.12.2006 г., табл. 2). В летние месяцы существенной зависимости концентрации примесей от направления ветра не отмечено, за исключением случаев с лесными пожарами.

Табл. 2

**Средние концентрации  $SO_2$  ( $\text{мкг/м}^3$ ) на станции мониторинга «Листвянка» при разных направлениях ветра (летние и зимние месяцы)**

Направление ветров	Август	Январь
ЮВ (со стороны озера)	3,3	7,6
СЗ (со стороны долины Ангары)	3,6	36,7

Одним из индикаторов вклада близких источников в концентрации примесей на Южном Байкале мог быть  $NO$ , который в процессе переноса быстро окисляется до  $NO_2$ . Однако оказалось, что, хотя временная изменчивость  $NO_2$  в Листвянке хорошо коррелирует с колебаниями  $SO_2$ , при этом  $NO$  практически не регистрируется (в отличие от Иркутска, где его кон-



**Рис. 4.** Случай кратковременного влияния близкого местного источника на концентрацию газовых примесей на станции мониторинга «Листвянка», 25 декабря 2012 г. (после 19:00):

$T$  – температура воздуха;  $V$  – скорость ветра;  $Fi$  – направление ветра

центрации очень высоки и часто выше, чем у  $\text{NO}_2$ ). Случаи же регистрации  $\text{NO}$  одновременно с другими газами на станции мониторинга «Листвянка» буквально единичны и очень кратковременны (рис. 4). Это может означать, что высокие концентрации  $\text{SO}_2$  и  $\text{NO}_2$  на станции мониторинга «Листвянка» в большинстве случаев не связаны с ближайшими источниками ( $\text{NO}$  успевает окислиться до  $\text{NO}_2$ ) [19, 21].

Таким образом, данные зимних измерений антропогенных примесей на станции мониторинга «Листвянка» указывают на существенный вклад крупных региональных источников, прежде всего угольных ТЭЦ Иркутско-Ангарского промышленного узла, в загрязнение атмосферы над Южным Байкалом. Хотя при распространении данных мониторинга на всю акваторию необходимо учитывать, что они могут содержать также вклад локальных источников, влияние которых существенно только в окрестностях населенного пункта. Это подтверждается также приводимыми ниже данными моделирования.

Существенное влияние региональных антропогенных источников в зимний период отмечается во многих сельских районах мира, например, в некоторых национальных парках Северной Америки (табл. 3 из [16]). Из таблицы 3 видно, что национальный парк Great Smoky Mountains, расположенный в промышленных западных штатах США, явно испытывает антропогенное влияние по диоксиду серы. В парке Yellowstone, расположенном в северо-восточных штатах, этого влияния не прослеживается.

### Численные эксперименты с помощью модели

Для оценки возможного вклада местных и удаленных источников в формирование газовых примесей на станции мониторинга «Листвянка», а также на всю акваторию Южного Байкала использовались результаты расчетов по математической модели [4, 17]. Модель основана на численном решении пространственного нелинейного нестационарного полуэмпирического уравнения турбулентной диффузии примеси. Она учитывает процессы адвективного и конвективного переноса, турбулентной диффузии и трансформации примесей, выбрасываемых в атмосферу предприятиями, рельеф местности. Данная модель применялась ранее при численном исследовании процессов распространения и трансформации в регионе озера Байкал соединений серы и азота [10–12], тяжелых металлов [4, 13].

В качестве исходной используется система уравнений в следующем виде:

$$\frac{\partial S}{\partial t} + V \cdot \text{grad}S - W_g \frac{\partial S}{\partial x_3} = \sum_{i=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_i} K_i \frac{\partial S}{\partial x_i} - AS + F. \quad (1)$$

Здесь  $t$  – время;  $V = (u, v, w)$  – вектор скорости;  $u, v$  – горизонтальные и  $w$  – вертикальная компоненты вектора скорости движения воздуха вдоль осей декартовой прямоугольной системы координат  $(x_1, x_2, x_3)$ ;

$S = \{S_j\}$  – тензор массовых концентраций исследуемых примесей ( $j = 1, \dots, n$ );  $K_1, K_2, K_3$  – коэффициенты турбулентной диффузии по осям  $x_1, x_2, x_3$  соответственно;  $A(x_i, t) = \{A_{jk}(x_i, t)\}$  – матричный оператор, описывающий взаимодействие различных субстанций между собой и их локальные изменения;  $i = 1, 2, 3, k = 1, \dots, L; L = n \cdot (n^2 + n + 1)$ ;  $F(x_i, t)$  – вектор-функция, описывающая источники примесей;  $W_g = \{W_{gj}\}$  – тензор скоростей гравитационного оседания субстанций;  $n$  – количество субстанций в многокомпонентной среде.

Имея в виду решение задачи о распространении примесей над региональной областью, предполагаем фоновое распределение концентраций субстанций известным. Из-за отсутствия детальной информации из наблюдений в качестве начальных условий приняты  $S_j$ , равные фоновому распределению, а при его отсутствии  $S_j = 0$ .

В качестве краевых условий приняты:

$$\begin{aligned} \frac{\partial S_j}{\partial x_1} &= 0 \text{ при } x_1 = 0, X, \\ \frac{\partial S_j}{\partial x_2} &= 0 \text{ при } x_2 = 0, Y, \\ \frac{\partial S_j}{\partial x_3} &= 0 \text{ при } x_3 = 0, H, \end{aligned} \quad (2)$$

где:  $x_1 = 0, x_1 = X, x_2 = 0, x_2 = Y, x_3 = H$  – границы области счета. На уровне подстилающей поверхности поставлено граничное условие, учитывающее отражение и поглощение примесей в зависимости от свойств подстилающей поверхности.

Уравнение турбулентной диффузии примеси вместе с начальными и граничными условиями численно интегрируется в декартовой системе координат с применением метода фиктивных областей [5]. При решении задачи используется метод расщепления по физическим процессам [6].

С помощью описанной модели рассчитывались концентрации первичных и вторичных примесей в узлах в общем случае нерегулярной пространственной сетки. Используя измеренные значения скорости осаждения тяжелых примесей и рассчитанные концентрации, оценивались интенсивности осаждения примесей на подстилающую поверхность рассматриваемого региона.

В эксперименте исследовалось возможное влияние выбросов местной угольной котельной, расположенной в 1 км от станции мониторинга, на результаты регистрации высоких концентраций  $\text{SO}_2$  в пункте мониторинга. Область интегрирования занимала площадь  $1100 \times 500 \text{ м}^2$ , высота составляла 1000 м над поверхностью озера Байкал. Шаг по пространству равнялся 5 м. Значение коэффициента турбулентной диффузии примесей при расчетах изменялось от 5 до  $25 \text{ м}^2/\text{с}$ . Расчеты показали, что при малых значениях коэффициента турбулентной диффузии примесей и направлении шлейфа выбросов котельной к станции мониторинга значения концентраций диоксида

Табл. 3

Концентрации  $\text{SO}_2$  в некоторых национальных парках США, март 1993–февраль 1994 (в  $\text{мкг}/\text{м}^3$ )

Национальный парк	Среднее	Медиана	Максимум	Минимум
Great Smoky Mountains	2,9	1,5	37,6	0,16
Yellowstone	0,08	0,07	0,38	0

Измеренные концентрации малых газовых и аэрозольных примесей, характерные для сельской местности средних широт и рассчитанные по модели для станции «Листвянка»

Компонент	Концентрации, мкг/м <sup>3</sup>		
	Средние для сельских районов	Рассчитанные, ст. «Листвянка»	Измеренные, ст. «Листвянка»
NO <sub>2</sub>	0,5–5	0,1–1	4–12
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,1–15	0,4–8	0,3–0,7
O <sub>3</sub>	50–150	10–74	25–40
ОН <sup>-</sup>	0,00005–0,0005	0,0001–0,0003	Нет данных
HO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	0,01–0,1	0,005–0,02	Нет данных
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	0,5–5	1–3	Нет данных
SO <sub>2</sub>	1–20	0,5–300	2–250
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	1–10	0,1–3	1–4

серы на ней могут достигать больших величин (до 200–250 мкг/м<sup>3</sup>).

Результаты проведенных расчетов сравнивались с концентрациями аэрозолей и некоторых малых газовых примесей в атмосфере, полученными при измерениях в сельской местности средних широт в различных регионах земного шара (табл. 4). Сравнение показало, что рассчитанные по модели концентрации малых газовых примесей атмосферы удовлетворительно согласуются со значениями концентраций, характерными для сельской местности средних широт [2, 7–9, 14, 15, 24].

### Выводы

1. Результаты длительного атмосферного мониторинга соединений серы и азота в районе пос. Листвянка (Южный Байкал), а также данные математического моделирования показали, что основное поступление антропогенных примесей на юг озера связано с ветрами северо-западного направления в зимний период года (до 300 мкг/м<sup>3</sup> в пиковых концентрациях при средних значениях 30–40 мкг/м<sup>3</sup>). В летний период существенного вклада местных и региональных источников в загрязнение атмосферы на Байкале по данным мониторинга не выявлено, хотя глобальный перенос при этом может иметь место, что дает в среднем 10–20 мкг/м<sup>3</sup>.

2. На станции мониторинга «Листвянка» в зимний период наряду с региональными переносами приме-

сей регистрируются кратковременные, но сильные влияния местных источников, что должно учитываться при оценках переноса на весь Байкал, так как масштабы влияния местных источников не могут быть велики.

3. Учитывая расположение станции мониторинга «Листвянка», постоянный контроль исправности приборов, длинный ряд наблюдений и метеорологическое сопровождение, можно считать, что представленные в работе данные о переносах малых газовых примесей от региональных источников в атмосферу озера Байкал являются достаточно репрезентативными.

4. Описанные в статье экстремальные случаи изменения газового состава атмосферы происходят постоянно в поздний осенний – ранний зимний периоды (в северном полушарии) из-за возникновения больших термобарических градиентов между территориями, имеющими разную подстилающую поверхность (суша-озеро, гора-долина). Исследования подобных случаев на Байкале будут способствовать пониманию развития процессов распространения примесей в других регионах.

Работа выполнена в рамках госпрограммы № VIII.76.1.5 «Изменение абиотических и биотических характеристик экосистемы озера Байкал под влиянием природных и антропогенных факторов».

### Литература

1. Аргучинцев В.К., Макухин В.Л., Оболкин В.А., Потемкин В.Л., Ходжер Т.В. Исследование распределения соединений серы и азота в приводном слое оз. Байкал // Оптика атмосферы и океана. – 1996. – Т. 9. – С. 748.

2. Барышев В.Б., Золотарев К.В., Кобелева Н.А., Потемкин В.Л., Ходжер Т.В. Исследование элементного состава проб атмосферных аэрозолей Байкальского региона методом РФА на пучке синхротронного излучения // Поверх-

ность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2002. – № 11. – С. 50.

3. Государственный доклад. О состоянии и об охране окружающей среды Иркутской области в 2002 г. – Иркутск : Главное управление природных ресурсов и охраны окружающей среды МПР России по Иркутской области, 2004. – 328 с.

4. Макухин В.Л., Потемкин В.Л. Моделирование переноса и трансформации загрязняющих

примесей, в том числе ртути, на акватории оз. Байкал // Биосфера. – 2012. – Т. 4. – С. 286–292.

5. Марчук Г.И. Методы вычислительной математики. – М. : Наука, 1980. – 534 с.

6. Марчук Г.И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. – М. : Наука, 1982. – 320 с.

7. Метеорологические аспекты загрязнения атмосферы. Т. 3. – М. : Гидрометеоздат, 1981. – С. 91.

8. Мониторинг состояния озера Байкал / Под ред. Ю.А. Израэля и Ю.А. Анохина. – Л. : Гидрометеоздат, 1991. – 262 с.

9. Никаноров А.М. Гидрохимия. – Л. : Гидрометеоздат, 1989. – 352 с.

10. Оболкин В.А., Потемкин В.Л., Ходжер Т.В., Голобокова Л.П., Филиппова У.Г., Макухин В.Л., Тода 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 атмосферы и океана. – 2009. – Т. 22. – С. 853–858.

11. Потемкин В.Л., Макухин В.Л. Распределение малых газовых примесей в атмосфере над озером Байкал // География и природные ресурсы. – 2008. – № 2. – С. 80–84.

12. Потемкин В.Л., Макухин В.Л. Загрязнение ландшафтов в котловине озера Байкал при лесных пожарах // География и природные ресурсы. – 2007. – № 4. – С. 60–63.

13. Потемкин В.Л., Макухин В.Л., Гусева Е.А. Исследование процессов переноса и осаждения ртутьсодержащих веществ в атмосфере Южного Прибайкалья // Оптика атмосферы и океана. – 2011. – Т. 24. – С. 906–909.

14. Скубневская Г.И. Определение химического состава продуктов, возникающих при фотохимическом смогообразовании // Методы анализа объектов окружающей среды. – Новосибирск : Наука СО, 1988. – С. 5–36.

15. Ходжер Т.В., Оболкин В.А., Потемкин В.Л. О роли атмосферы в формировании химиче-

ского состава вод оз. Байкал // Оптика атмосферы и океана. – 1999. – Т. 12. – С. 512–515.

16. Aerosol collection and compositional analysis for IMPROVE: annual report (July 1993–July 1994, University of California, Davis). – 1994. – 107 p.

17. Arguchintsev V.K., Makukhin V.L. Simulation of the spreading and transformation of sulphur and nitrogen compounds in the atmosphere of the southern region around Lake Baikal // SPIE Proceedings. – 2000. – № 4341. – P. 593–599.

18. Bashurova V.S., Dreiling V., Hodger T.V., Jaenicke R., Koutsenogii K.P., Koutsenogii P.K., Kraemer M., Makarov V.I., Obolkin V.A., Potjomkin V.L., Pusep A.Y. Measurements of atmospheric condensation nuclei size distributions in Siberia // J. Aerosol Sci. – 1992. – Vol. 23. – P. 191–199.

19. Cocks A.T., Kallend A.S., Marsh A.R.W. Dispersion limitations of oxidation in power plant plumes during long-range transport // Nature. – 1983. – Vol. 305. – P. 122–123.

20. Lovblad G., Henningsson E., Sjoberg K., Brorstrom-Lunden E., Lindskog A., Munthe L. Trends in Swedish background air. EMEP Assessment. Part II. National contribution. – Oslo, 2004. – P. 211–220.

21. 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. Stud. – 2014. – Vol. 71. – P. 391–397.

22. Russian national network // Proceedings of Seventh Senior Technical Managers Meeting of the Acid Deposition Monitoring Network in East Asia. – Yangon, 2006. – P. 163–165.

23. Schaugh J., Solberg S., Torseth K., Barrett K., Hole L., Aas W. National assessment report for Norway. EMEP Assessment. Part II. National contribution. – Oslo, 2004. – P. 157–173.

24. Thompson A.M. Measuring and modeling the tropospheric hydroxyl radical (OH) // J. Atmospheric Sci. – 1995. – Vol. 19. – P. 3315–3327.

