

О.Г. Нецветева, Л.П. Голобокова, В.Л. Макухин,
В.А. Оболкин, Н.А. Кобелева

Экспериментальные и теоретические исследования ионного состава атмосферных осадков в регионе Южного Байкала

Лимнологический институт СО РАН, г. Иркутск

Поступила в редакцию 17.02.2003 г.

Рассматриваются результаты исследований (1998–2002 гг.) химического состава атмосферных осадков на станциях мониторинга Прибайкалья (Иркутск, Листвянка, Монды). Показано, что наибольшему закислению подвержены влажные выпадения на ст. Листвянка. Рассчитаны потоки основных ионов на подстилающую поверхность изучаемой территории. С помощью математической модели, основанной на численном решении пространственного нелинейного нестационарного полуэмпирического уравнения турбулентной диффузии примеси, рассчитаны потоки сульфатов и нитратов с атмосферными осадками в регионе Южного Байкала. Модельные оценки потоков этих ионов на ст. Иркутск и Листвянка по порядку величины соответствуют значениям, полученным на основе экспериментальных данных.

Введение

Результаты инструментальных исследований свидетельствуют о том, что проблема кислотных выпадений, уже давно остро стоящая в наиболее индустриально развитых странах мира, актуальна и для Байкальского региона [1, 2]. Комплексное изучение этой проблемы было начато нами с 1998 г. на трех станциях круглогодичного мониторинга кислотных выпадений [3–7]. В продолжение изучения важнейших аспектов по данному вопросу в статье рассматриваются результаты исследований кислотности и ионного состава атмосферных осадков (АО), и в первую очередь соединений, влияющих на их подкисление – сульфатов и нитратов, а также ионов аммония как источника потенциальной кислотности [8].

Материал и методы

Материалом для данной статьи послужили результаты химического анализа около 700 отдельных АО, выпавших за период с октября 1998 по октябрь 2002 г. На ст. Иркутск и Монды в зимний период АО отбирались в пластиковые емкости, что несколько повышало минерализацию и величину pH в пробах снега за счет вклада сухого осаждения аэрозольных частиц. На ст. Листвянка свежеснеживший снег собирался с поверхности утрамбованной снежной площадки, что должно было уменьшить влияние сухого осаждения на химический состав образцов снега за счет адсорбции частиц поверхностью этой площадки. Сбор влажных выпадений в теплый период производился преимущественно автоматическими осадкосборниками, что позволило более надежно разделить влажные и сухие выпадения.

В АО велось определение pH, удельной электропроводности, основных катионов и анионов. Измерение pH и электропроводности осуществлялось с помощью приборов японской фирмы «Hogiba». Анионы (HCO_3^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , Cl^-) определялись ме-

тодом ионной хроматографии на высокоэффективном жидкостном хроматографе Милихром А-02 («Эко-Нова», Новосибирск) [9]. Катионы (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) – методом атомно-абсорбционной спектрофотометрии на приборе ААС-30 («Karl Zeiss Jena», Германия). Ионы NH_4^+ и NO_2^- определялись колориметрически с реактивами Несслера и Грисса соответственно на спектрофотометре PU-8700 фирмы «Philips» [10, 11]. Качество полученного материала контролировалось путем расчета $R1$ – ошибки баланса между эквивалентными формами сумм анионов и катионов и $R2$ – ошибки, полученной при сравнении рассчитанной и измеренной электропроводности [12]. Суммарная ошибка определений не превышала 10%.

Обсуждение результатов

Полученные в 1998–2002 гг. материалы свидетельствуют о том, что на ст. Листвянка не обнаружено существенной разницы в кислотности зимних и летних влажных выпадений, как это наблюдается на других станциях. На ст. Монды и Иркутск сезонный ход величин pH в АО практически совпадает (рис. 1).

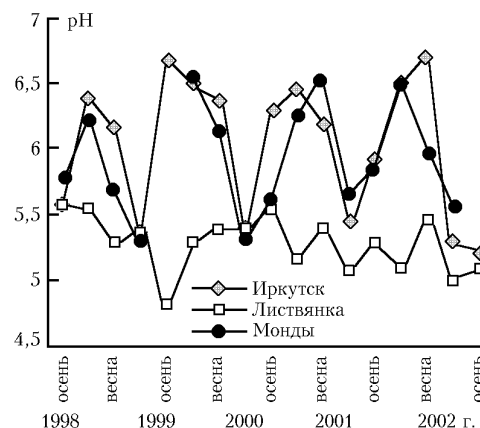


Рис. 1. Сезонная динамика pH в АО на станциях мониторинга Байкальского региона

Максимумы рН в АО осенне-весеннего периода связаны со значительно меньшим количеством выпавших осадков и длительностью сухих периодов, во время которых в атмосфере скапливается большое количество примесей. Усиление в весенний период скорости ветра, поднимающего частицы пыли в воздух, ежегодное сжигание мусора и лесные пожары также повышают концентрации всех ионов и величины рН в АО. В зимние месяцы в Иркутске дополнительным источником повышения минерализации и снижения кислотности влажных выпадений являются зольные выбросы предприятий теплоэнергетики. Более низкие величины рН в летний период на всех станциях обусловлены большим количеством АО. В течение июня–августа в регионе выпадает 50–80% годовой нормы осадков, способствующих очищению атмосферы от примесей как природного, так и антропогенного характера.

Как показали расчеты (рис. 2), наиболее кислые дожди (рН = 4,0÷4,5) чаще всего встречаются на ст. Иркутск и Листвянка. Выпадение дождей с рН = 4,5÷5,0 наиболее характерно для ст. Листвянка, а с рН = 5,0÷5,5 – для ст. Монды и Иркутск. В снежных выпадениях ст. Листвянка наиболее часто повторяются значения рН = 5,0÷5,5, ст. Монды – 6,0÷6,5, ст. Иркутск – 6,5÷7,0.

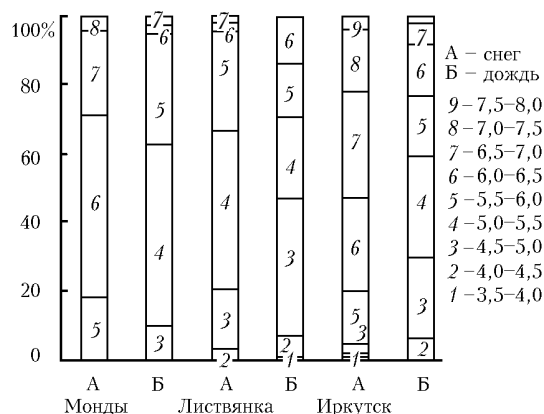


Рис. 2. Повторяемость различных рН в АО на станциях мониторинга Байкальского региона (1998–2002 гг.)

На станциях мониторинга кислотность дождей, как правило, не связана напрямую с концентрацией выпавших анионов. Коэффициенты корреляции между ионами H^+ и анионами сильных кислот имели в большинстве случаев отрицательные значения. Максимальное значение этого коэффициента (0,46)

рассчитано на ст. Монды летом 2000 г. для ионов H^+ и NO_3^- . Кислотность дождей определялась тогда, в основном, нитратами (0,5–1,5 мг/л), поскольку концентрации сульфатов были очень низки (0–0,4 мг/л). Однако в общем случае кислотность АО обусловлена не только содержанием анионов сильных кислот, но и количеством катионов, способных нейтрализовать избыточную кислотность. Для выяснения эффективности этого процесса в АО были рассмотрены различные варианты соотношений содержания катионов и анионов в АО (табл. 1). Данные в табл. 1 представлены в виде средних значений за 4 года исследований.

Вклад ионов Na^+ и K^+ в составе АО Прибайкалья незначителен по сравнению с Ca^{2+} и NH_4^+ , поэтому при расчетах они не учитывались. Как следует из табл. 1, на станциях мониторинга отношение концентраций основных катионов и анионов в дождях (вариант 4) близко или чуть больше 1, т.е., исходя из этих соотношений, мы не можем говорить о проблеме кислотных выпадений в Байкальском регионе. Однако при рассмотрении каждого случая выпадения АО обнаруживается, что в 43, 65 и 71% случаев дождей на ст. Иркутск, Монды и Листвянка соответственно отношение катионов к анионам меньше 1, а в 7, 15 и 18% случаев дождей $\leq 0,5$. Из этого следует, что на станциях мониторинга периодически возникают ситуации закисления АО.

На ст. Монды некоторая нехватка катионов в АО летнего периода происходит, в основном, за счет дефицита ионов Ca^{2+} и Mg^{2+} эрозийного происхождения, поскольку ионов NH_4^+ в дождях содержится в избытке ($NH_4^+/SO_4^{2-} > 1$). Большая часть дождей на этой станции выпадает в июне–июле, и именно для осадков этого периода характерны очень низкие концентрации катионов. Снижение содержания Ca^{2+} с 1,3 (максимум летнего периода) до 0,01–0,25 мг/л, а всех остальных катионов до аналитического нуля приводит к увеличению концентраций ионов водорода, т.е. к снижению величин рН до 4,7–5,2. Более низких значений рН на этой станции не обнаружено. В ряде случаев (в 17% дождей) ионы водорода занимали доминирующее среди катионов положение.

Как нам кажется, кислотность дождей ст. Монды в большинстве случаев обусловлена естественными причинами, т.е. природным содержанием в атмосфере кислотных компонент. При грозах в атмосфере образуется большое количество оксидов азота, способных быстро превращаться в азотную и азотистую

Таблица 1
Кислотность и отношение средних эквивалентных концентраций (мкг-экв/л) основных кислотообразующих и нейтрализующих ионов в АО (1998–2002 гг.)

Станция	АО	рН	NH_4^+/SO_4^{2-}	$Ca^{2+} + Mg^{2+}$		$NH_4^+ + Ca^{2+} + Mg^{2+}$	
				1	2	3	4
Монды	Дождь	5,45	1,1	0,9	0,5	0,9	
	Снег	6,27	0,5	2,7	1,9	1,7	
Листвянка	Дождь	5,12	0,7	0,8	0,5	0,9	
	Снег	5,35	0,4	1,3	0,7	0,9	
Иркутск	Дождь	5,43	0,7	1,1	0,7	1,1	
	Снег	6,48	0,4	1,9	1,3	1,4	

кислоты [14]. Возможно, максимальное содержание нитратов в дождях ст. Монды (1,5 мг/л) обусловлено именно этой причиной. В большинстве же дождей на этой станции концентрации нитратов находились в пределах 0,4–0,6 мг/л. Максимальное содержание сульфатов в низкоминерализованных дождях (0,3–2,5 мг/л) не превышало 1,2 мг/л. Дальнейшее увеличение концентрации этого иона всегда приводило к уменьшению кислотности АО, так как при этом повышалось и содержание катионов.

Таким образом, на ст. Монды увеличение кислотности дождей при низкой минерализации происходило в большинстве случаев не за счет высокого содержания анионов сильных кислот, а за счет отсутствия в достаточных количествах катионов эрозийного происхождения, способных их нейтрализовать. Такие же особенности, но в химическом составе снега, отмечаются в северных районах Западной Сибири [13]. В снежных выпадениях ст. Монды полная нейтрализация кислотности осуществляется в основном за счет кальция и магния природного происхождения, на что указывают как высокие значения отношений катионов к анионам (вариант 4), так и низкая кислотность снега (см. табл. 1, рис. 2).

На ст. Листвянка почти все рассматриваемые отношения (варианты 1–4) меньше 1 в течение года. Это свидетельствует о постоянной нехватке катионов как литофильного, так и атмосферного происхождения в составе дождевых вод и снега. Дефицит нейтрализующих катионов проявляется в преобладании иона H^+ в 25% случаев выпадающих на станции дождей. Уменьшение отношения (вариант 2) с 1,3 до 0,7 (вариант 4) при суммировании сульфатов и ионов NO_3^- указывает на существенное влияние этого иона на кислотность снежных выпадений ст. Листвянка. Об этом также говорит наличие корреляционной связи ($k_{кор} = 0,6$) между ионами H^+ и NO_3^- зимой 1999 и 2001 гг. и высокие значения (1–5) отношения NO_3^-/SO_4^{2-} в декабре–феврале, чего не наблюдалось на других станциях. В Листвянке отмечается также постепенное увеличение доли нитратов в ионном составе снега (с 10% в 1999 г. до 23% в 2002 г.). Кроме того, если в 1999 г. ион NO_3^- был преобладающим в 21% случаев снежных выпадений в Листвянке, то в 2002 г. — уже в 53%. Соответственно значительно сократилось количество проб с доминированием сульфата. Все это указывает

на появление дополнительного локального источника иона NO_3^- на станции. Скорее всего, им является местная котельная, которая сменила уголь на мазут. При горении мазута, как и при любом высокотемпературном процессе, образуется значительно больше оксидов азота, чем при сжигании угля, что и приводит к увеличению доли нитратов.

Таким образом, по сравнению с другими станциями мониторинга, наибольшему закислению в течение года подвержены влажные выпадения ст. Листвянка. Это происходит за счет переноса кислотообразующих веществ из промышленных центров Иркутской области, влияния местных источников кислотных газов при нехватке в составе АО катионов, способных нейтрализовать избыточную кислотность.

Как следует из табл. 1, в дождях ст. Иркутск нейтрализация кислотности анионов сильных кислот осуществляется совместным действием всех катионов. В промышленном центре этот процесс протекает наиболее эффективно за счет более высокого содержания щелочных компонентов в атмосфере и, следовательно, более высокой доли ионов Ca^{2+} и Mg^{2+} в составе дождей (табл. 2).

Однако, как следует из рис. 2, в Иркутске периодически выпадают дожди с повышенной кислотностью, их количество колеблется от 8 до 11% в разные годы от общего числа влажных выпадений, что в 2–3 меньше, чем в Листвянке.

Анализ обратных траекторий движения воздушных масс показывает, что случаям наиболее сильного подкисления дождей на изучаемых станциях сопутствуют малые скорости атмосферных переносов, что, по-видимому, указывает на основной вклад региональных промышленных центров в подкисление АО.

Сравнение долевого распределения ионов в дождях на станциях мониторинга показывает, что суммарный вклад нитратов и сульфатов несколько выше на ст. Листвянка (38,6% экв. против 37,1% экв. на ст. Иркутск и Монды) при меньшей доле суммы кальция, магния и аммония (табл. 2). Некоторое уменьшение вклада протонов водорода здесь по сравнению с дождями ст. Монды связано с большей долей ионов калия и натрия. Сопоставление сезонного распределения ионов в АО свидетельствует о влиянии различных факторов на формирование ионного состава снеговых и дождевых вод. Так, на ст. Монды

Таблица 2

Долевое распределение основных ионов в АО на станциях мониторинга Байкальского региона, % экв. (1998–2002 гг.)

АО	HCO_3^-	SO_4^{2-}	NO_3^-	Cl^-	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	NH_4^+	H^+
<i>Монды</i>										
Снег	20,3	16,8	6,5	5,7	3,6	1,9	29,9	6,0	8,2	0,9
Дождь	4,4	22,1	15,0	5,9	2,7	1,4	12,4	3,5	21,0	10,4
<i>Листвянка</i>										
Снег	2,8	24,9	17,9	4,2	4,2	2,5	22,6	5,6	10,6	4,7
Дождь	4	26,6	12,0	5,7	3,4	2,7	15,6	4,2	16,5	9,3
<i>Иркутск</i>										
Снег	14,3	21,8	7,4	5,4	4,8	1,3	30,4	4,9	8,8	0,7
Дождь	5,6	27,3	9,8	5,3	2,2	1,3	20,2	4,5	17,8	5,9

преобладание иона HCO_3^- среди анионов снеговых вод указывает на большой вклад эрозионных источников его поступления в атмосферу и выпадающий снег. Это же подтверждают высокие значения коэффициента корреляции (0,92) между ионами HCO_3^- , Ca^{2+} .

В дождях доминирующими ионами являются NH_4^+ и SO_4^{2-} , однако хорошая взаимная динамика этих ионов наблюдалась только летом 2001–2002 гг. Во все годы, кроме 2001-го, ион SO_4^{2-} хорошо коррелировал с литофильными катионами, указывая существование не только атмосферного, но и эолового источника сульфатов в составе дождей.

В снежных выпадениях на ст. Листвянка и Иркутск (при доминировании ионов SO_4^{2-} и Ca^{2+}) доля сульфата и нитрата выше в Листвянке, а кальция и гидрокарбоната в Иркутске. Это вполне закономерно, поскольку максимальная трансформация кислотных газов SO_2 и NO_x в соответствующие кислоты и, следовательно, их влияние на состав АО сильнее ощущаются не у источника выбросов, а на некотором удалении от него. Ионы кальция в составе крупнодисперсных частиц CaSO_4 и $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ быстрее оседают у источников, что всегда сказывается на составе снежных выпадений. Хорошая корреляция между этими ионами наблюдалась в Иркутске за все время наблюдений.

Обращает на себя внимание постоянная взаимная динамика ионов Na^+ и Cl^- в снежных выпадениях Иркутска. Вряд ли она связана с «морским фактором» формирования состава снега. Более вероятен антропогенный источник его поступления, а именно перенос загрязненных воздушных масс со стороны г. Усолье-Сибирское, где находится предприятие по производству поваренной соли. В дождях ст. Листвянка и Иркутск (при сохранении преобладающего аниона SO_4^{2-}) в Листвянке доля ионов аммония несколько выше, чем кальция, в Иркутске – наоборот. От 1999 к 2002 г. отмечаются все больший рост доли ионов аммония и водорода и снижение вклада кальция в ионном составе дождей ст. Листвянка. Здесь корреляция между ионами NH_4^+ и SO_4^{2-} наблюдалась только в 2000–2001 гг., что, скорее всего, связано с большим количеством выпавших в эти годы дождей по сравнению с 1999 и 2002 гг. и, значит, с более регулярным очищением атмосферы от примесей.

Ведь хорошо известно, что сульфат аммония является основным растворимым компонентом кон-

тинентального аэрозоля только в удаленных от источников загрязнения районах [14]. На ст. Иркутск хорошая взаимосвязь ионов SO_4^{2-} и Ca^{2+} наблюдалась во все годы, кроме 2002 г.

На основе экспериментально полученных концентраций основных ионов и количества выпавших осадков были рассчитаны величины потоков основных ионов по общепринятой методике [15]. Как следует из табл. 3, большая часть годовой суммы ионов на ст. Листвянка и Монды выпадает с дождями. Это вполне естественно, поскольку максимальное количество АО на этих станциях выпадает в теплое время года. В Иркутске же потоки некоторых ионов (HCO_3^- , Cl^- , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) со снегом выше, чем с дождем, за счет их более высокого содержания в снежных выпадениях. Это связано со значительным загрязнением атмосферы промышленного центра в зимний период продуктами антропогенной деятельности, в том числе и твердыми выбросами предприятий теплоэнергетики. Что касается сульфатов, нитратов, аммония и ионов водорода, то их количество значительно выше в теплое время года на всех станциях.

В дополнение к экспериментальным исследованиям были проведены расчеты потоков сульфатов и нитратов на подстилающую поверхность изучаемой территории с помощью математической модели, основанной на численном решении пространственного нелинейного нестационарного полумпирического уравнения турбулентной диффузии примеси [16]. Исследовались процессы распространения, трансформации и осаждения с осадками соединений серы и азота над долиной р. Ангара и Южным Байкалом. Учитывались стационарные и нестационарные источники выбросов оксидов серы и азота, расположенные в Приангарье, Южном Прибайкалье, долине р. Селенга. Величины массового расхода диоксидов серы и азота были определены на основе работ [17, 18]. Статистические характеристики поля ветра, использованные в расчетах, были получены при обработке данных многолетних наблюдений за вектором скорости ветра [19].

Расчеты проводились в области площадью 500×250 км и высотой 5 км над поверхностью оз. Байкал. Основные характеристики источников выбросов и значения сеточных параметров приведены в [5]. Так как процессы образования серной и азотной кислот, сульфатов и нитратов в каплях идут значительно интенсивнее, чем в воздухе, то при вымывании примесей осадками применялись

Таблица 3

Средние потоки основных ионов с атмосферными осадками в 2000–2002 гг., мг/м ²										
АО	HCO_3^-	SO_4^{2-}	NO_3^-	Cl^-	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	NH_4^+	H^+
<i>Иркутск</i>										
Дождь	233	845	367	71	26	32	281	32	177	3,06
Снег	809	685	193	102	65	31	455	37	91	0,13
<i>Листвянка</i>										
Дождь	102	456	266	52	22	30	101	15	112	3,64
Снег	24	218	201	26	17	25	85	14	26	0,85
<i>Монды</i>										
Дождь	83	220	175	31	11	15	59	8	93	1,13
Снег	43	36	14	5	2	3	20	2	9	0,02

константы скоростей реакций окисления диоксидов серы и азота для водной среды. Учитывалось гравитационное осаждение капель дождя.

С использованием рассчитанных по модели пространственных полей концентраций соединений серы и азота была определена массовая скорость потока сульфатов и нитратов с АО на подстилающую поверхность исследуемого региона за отдельные сутки (рис. 3) и за год в целом (рис. 4). Наибольшее количество осадков в исследуемом регионе выпадает

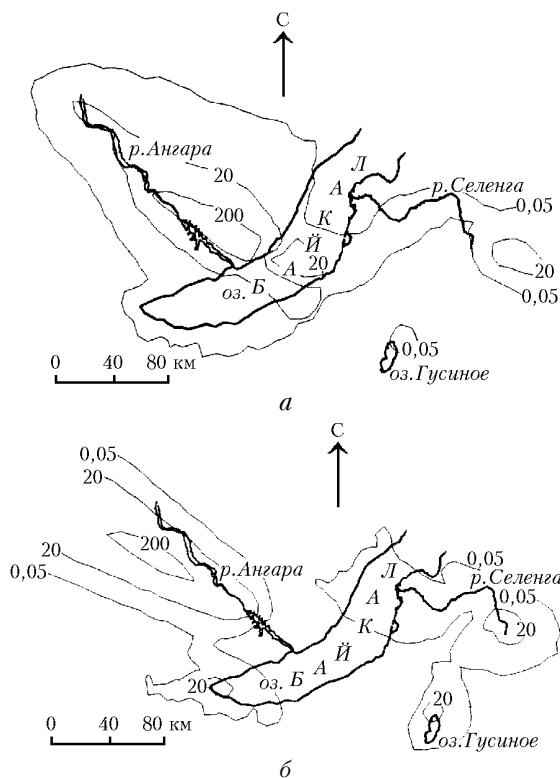


Рис. 3. Изолинии рассчитанной массовой скорости потока суммы сульфатов и нитратов с АО у подстилающей поверхности региона Южного Байкала, $\text{мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$: *a* — при северо-западном ветре, *b* — при юго-восточном

при прохождении атлантических циклонов, поэтому были проведены расчеты при северо-западном потоке, скорость которого постоянна и равна 5 м/с (рис. 3, *a*). Результаты показали, что на поверхность озера с АО выпадает за сутки 50 т сульфатов и нитратов суммарно. Наибольший вклад в загрязнение озера в данном случае вносят предприятия и автотранспорт Иркутско-Черемховского промышленного узла — 92%; вклад гг. Слюдянка и Байкальск — 8%; влияние источников загрязнения в долине Селенги несущественно. Значительно реже выпадают АО в Байкальском регионе при выходе южных циклонов. На рис. 3, *b*

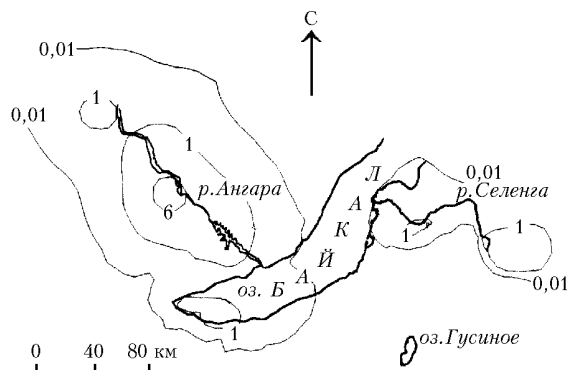


Рис. 4. Изолинии рассчитанной усредненной массовой скорости потока суммы сульфатов и нитратов с АО у подстилающей поверхности региона Южного Байкала, $\text{г}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$

представлены результаты расчетов влажных выпадений сульфатов и нитратов при юго-восточном ветре со скоростью 5 м/с. На поверхность Байкала выпадает за сутки 20 т сульфатов и нитратов. Наибольший вклад в загрязнение озера вносят источники выбросов в долине р. Селенга — 90%; вклад источников выбросов гг. Слюдянка и Байкальск — 10%.

При оценке годового влажного осаждения соединений серы и азота учитывалась информация о количестве АО, выпадающих в различных районах исследуемой территории [20]. Рис. 4 иллюстрирует распределение плотности массового расхода суммы сульфатов и нитратов в рассматриваемом регионе. Сравнение результатов расчетов с оценками годового влажного осаждения в исследуемом регионе показало, что рассчитанные по модели значения массовой скорости потока за год в Иркутске и Листвянке по порядку величины соответствуют значениям, полученным при анализе данных измерений (табл. 4).

Сравнение рассчитанных по модели величин выпадений нитратов и сульфатов за сутки с реальными потоками этих ионов с отдельными АО в Иркутске и Листвянке также показывает их удовлетворительное согласие. Средние потоки суммы сульфатов и нитратов с отдельными АО ст. Иркутск и Листвянка равны 25 и 20 $\text{мг}/\text{м}^2$ соответственно. Полученные по модели аналогичные величины с учетом реального количества дней с АО на станциях соответственно составляют в среднем 32 и 15 $\text{мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$. При сравнении следует иметь в виду, что на ст. Листвянка при расчетах не учитывались источники выбросов в самом поселке, а в Иркутске пункт отбора АО находится на некотором удалении от центра города, где воздух наиболее загрязнен. С уточнением параметров источников

Таблица 4

Годовые потоки сульфатов и нитратов на подстилающую поверхность, $\text{мг}/\text{м}^2$

Станция	Сульфаты		Нитраты	
	Эксперимент	Расчет	Эксперимент	Расчет
Иркутск	1336–1702	1800	398–706	1200
Листвянка	593–744	500	427–494	400

выбросов при их инвентаризации и пространственных характеристик ветрового потока в рассматриваемом регионе за наблюдаемый период результаты расчетов по модели должны еще более соответствовать реальным процессам.

Заключение

Исследования химического состава отдельных АО на станциях мониторинга Байкальского региона показали, что АО на ст. Листвянка подвержены подкислению в течение всего года, на ст. Иркутск и Монды – преимущественно в летний период. Выпадение кислых дождей в Листвянке и Иркутске связано с переносом загрязненных воздушных масс из промышленных районов Иркутской области в системе небольших малоподвижных циклонов. Снежные выпадения на ст. Листвянка подкисляются за счет влияния локальных источников. Кислотность АО на ст. Монды обусловлена природными факторами, что подтверждает характеристику этой станции как фоновой континентальной.

Вклад источников выбросов гг. Слюдянка и Байкальск в загрязнение южной части акватории оз. Байкал сульфатами и нитратами, выпадающими с АО, в два раза выше, чем вклад Иркутско-Черемховского промышленного узла. Сопоставление экспериментальных и первых расчетных данных по выпадению сульфатов и нитратов с АО на ст. Листвянка и Иркутск показало их неплохое согласие.

1. *Оболкин В.А., Ходжер Т.В., Анохин Ю.А., Прохорова Т.А.* Кислотность атмосферных выпадений в регионе Байкала // Метеорол. и гидрол. 1991. № 1. С. 55–60.
2. *Ермакова О.Д.* Зависимость функционирования отдельных компонентов экосистем Байкальского заповедника от кислотности атмосферных выпадений // Проблемы экологического мониторинга. Байкальск: Ин-т экологической токсикологии, 1998. С. 106–118.
3. *Нецветаева О.Г., Ходжер Т.В., Оболкин В.А., Кобелева Н.А., Голобокова Л.П., Коровякова И.В., Чубаров М.П.* Химический состав и кислотность атмосферных осадков в Прибайкалье // Оптика атмосф. и океана. 2000. Т. 13. № 6–7. С. 618–621.
4. *Ходжер Т.В., Семенов М.Ю., Оболкин В.А., Домышева В.М., Голобокова Л.П., Кобелева Н.А., Нецветаева О.Г., Потемкин В.Л., Сергеева М.В.* Мониторинг кислотных выпадений в Байкальском регионе // Химия в интересах устойчивого развития. 2002. Т. 10. № 5. С. 699–705.
5. *Голобокова Л.П., Кобелева Н.А., Макухин В.Л., Нецветаева О.Г., Оболкин В.А., Ходжер Т.В.* Некоторые результаты экспериментальных наблюдений и математического моделирования распределения подкис-

ляющих атмосферных примесей в регионе Южного Байкала // Химия в интересах устойчивого развития. 2002. Т. 10. № 5. С. 575–583.

6. *Нецветаева О.Г., Голобокова Л.П., Кобелева Н.А., Позодаева Т.В., Ходжер Т.В.* Особенности ионного состава снежного покрова на территории заповедников Предбайкалья: Тезисы докл. // IX Рабочая группа «Аэрозоли Сибири». Томск, ноябрь, 2002. Томск: Изд-во Института оптики атмосферы, 2002. С. 32.
7. *Семенов М.Ю., Сергеева М.В., Кобелева Н.А., Нецветаева О.Г.* Критические нагрузки подкисляющих соединений на наземные экосистемы Байкальского региона // Сиб. экол. ж. 2002. № 1. С. 85–94.
8. *Galloway G.N.* Acidification of the world: natural and anthropogenic // Proc. from the 6th Int. Conf. on Acidic Deposition. Tsukuba, 10–16 December, 2000. Dordrecht; Boston; London: Kluwer Acad. Publish., 2001. V. 1. P. 17–24.
9. *Барам Г.И., Верещагин А.Л., Голобокова Л.П.* Применение микроколонной высокоэффективной жидкостной хроматографии с УФ-детекцией для анализов анионов в объектах окружающей среды // Ж. анал. химии. 1999. Т. 54. № 9. С. 962–965.
10. *Методические указания по определению химического состава осадков* // Тр. главной геофиз. обс. Л.: Гидрометеоздат, 1980. 30 с.
11. *Фомин Г.С.* Вода. Контроль химической, бактериальной и радиационной безопасности по международным стандартам. М.: Протектор, 2000. 860 с.
12. *Acid deposition Monitoring Network in East Asia. Technical Manual for Monitoring Wet Deposition.* Interim Network Center, 2000. P. 55–58.
13. *Смоляков Б.С.* Проблема кислотных выпадений в Западной Сибири // Химия в интересах устойчивого развития. 2002. Т. 10. № 5. С. 521–545.
14. *Бримблжумб П.* Состав и химия атмосферы. М.: Мир, 1988. 350 с.
15. *Оболкин В.А., Ходжер Т.В.* Годовое поступление из атмосферы сульфатов и минерального азота в регионе оз. Байкал // Метеорол. и гидрол. 1990. № 7. С. 71–76.
16. *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.
17. *Государственный доклад. «О состоянии окружающей природной среды Иркутской области в 1999 году»* / Гл. ред. А.Л. Малевский. Иркутск: Гос. комитет по охране окр. среды Ирк. обл., 2000. 320 с.
18. *Охрана атмосферного воздуха: Статистический бюллетень.* Иркутск: Облкомстат, 2000. 165 с.
19. *Аргучинцев В.К., Аргучинцева А.В., Макухин В.Л.* Численное моделирование распространения твердых взвесей от промышленных предприятий в Южном Прибайкалье // Геогр. и природ. ресурсы. 1995. № 1. С. 152–158.
20. *Байкал: Атлас* / Гл. ред. Г.И. Галазий. М.: Федер. служба геодезии и картогр. России, 1993. 160 с.

O.G. Netsvetaeva, L.P. Golobokova, V.L. Makukhin, V.A. Obolkin, N.A. Kobeleva. Experimental and theoretical investigations of the ion composition of atmospheric precipitations in the Southern Baikal region.

The results of 1998–2002 studies of the chemical composition of atmospheric precipitations sampled at monitoring sites of the Baikal region (Irkutsk, Listvyanka, and Mondy) are considered. It is shown that wet precipitations at the Listvyanka site are most acidified. Atmospheric fluxes of major ions on the underlying surface of the territory studied are calculated. In the region of Southern Lake Baikal, the atmospheric fluxes of sulfates and nitrates are calculated using a mathematical model based on numerical solution of the spatial non-linear non-steady-state semi-empirical equation of turbulent diffusion of admixtures. At the Irkutsk and Listvyanka sites, the order of magnitude of the computer-simulated flux estimates corresponds to that calculated from the experimental data.