

Е.В. Чипанина-Моложникова¹, Л.П. Голобокова¹,
Е.В. Кучменко², О.Г. Нецветаева¹, Т.В. Ходжер¹

Условия формирования химического состава атмосферных аэрозолей и осадков над Байкальской природной территорией

¹Лимнологический институт СО РАН,

²Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, г. Иркутск

Поступила в редакцию 12.02.2007 г.

Для определения источников аэрозолей, поступающих на Байкальскую природную территорию (БПТ), проанализированы данные о химическом составе атмосферных аэрозолей (АА) и атмосферных осадков (АО). Предполагается, что г. Иркутск является характерным промышленным центром Восточной Сибири, высокогорная ст. Монды взята за фоновую, а ст. Листвянка представляет собой сельский пункт, находящийся под влиянием крупного промышленного центра. Посредством факторного анализа состава АО и АА определены основные источники (факторы) атмосферных примесей. Для рассматриваемых пунктов выявлены четыре основных фактора — почвенный, газофазный, антропогенный и местный. Для аэрозолей и осадков роль и состав факторов меняются. С использованием статистических методов (пакет программ STATISTICA) выделены циклические (сезонные) составляющие рядов наблюдений, а также оценены взаимосвязи между химическим составом аэрозолей и осадков в пункте наблюдений. Оценка роли адвективного (циркуляционного) фактора проводилась с учетом выделенных ранее четырех географических групп траекторий переноса воздушных масс.

Антропогенные источники исследовались суммарно. В дальнейшем планируется выявить вклады нестационарных источников (автотранспорта), энергетики и других промышленных объектов.

Введение

Проблема дальнего переноса антропогенных примесей представляет существенный интерес в связи с региональным и глобальным загрязнением воздушной среды. Цель данной статьи — рассмотреть зависимость химического состава атмосферных осадков (АО) и атмосферных аэрозолей (АА) в пунктах наблюдения (точках-рецепторах) от направления движения воздушных масс для Байкальской природной территории (БПТ). В качестве точек-рецепторов взяты:

— г. Иркутск — крупный промышленный центр Восточной Сибири;

— пос. Листвянка — населенный пункт, расположенный на северо-западном побережье Южного Байкала и находящийся под влиянием атмосферного переноса от г. Иркутска (60 км по направлению господствующих ветров);

— ст. Монды — высокогорная (2000 м над у.м.) фоновая станция на юге Восточного Саяна [1].

Материал и методы исследования

Традиционно для идентификации источников поступления загрязняющих веществ в регион-рецептор с атмосферными осадками и аэрозолями используют методы траекторного и факторного анализа [2, 3].

В данной статье оценка поступления загрязняющих веществ на рассматриваемую территорию с дальним переносом воздушных масс (ВМ) сделана на основе специальных исследований, включающих:

а) химический анализ состава атмосферных осадков, выпадающих на станциях мониторинга БПТ за период 1998–2004 гг.;

б) химический анализ состава растворимой фракции атмосферных аэрозолей, поступающих на станции мониторинга БПТ за тот же период;

в) факторный анализ данных о химическом составе АО и АА (метод главных компонент — вращение факторов методом VARIMAX);

г) идентификацию источников образования аэрозолей (региональный, дальний перенос), выполняемую с использованием модели дальнего переноса HYSPLIT [4].

Методика построения обратных траекторий

Для построения обратных траекторий движения воздушных масс использовалась модель HYSPLIT [4]. По архивным метеорологическим данным для каждого дня построены обратные траектории для разных сезонов года (1998–2004 гг.). Выделено 12 наиболее часто встречающихся типов траекторий для воздушных масс на высоте 1500 и 3000 м, в том числе

«местная циркуляция», соответствующая слабым скоростям ветра. В ходе выполнения исследований было подтверждено, что на юге Восточной Сибири преобладает западный, северо-западный и юго-западный перенос, реже всего встречаются воздушные массы, приносимые с востока (с учетом юго-восточного и северо-восточного направлений – от 1 до 13%).

При разработке методики классификации траекторий ВМ (4 сектора) [5] авторы ориентировались на общепринятые представления о том, что свойства ВМ определяются районом ее формирования, а также на географическую классификацию ВМ [6]. Согласно [5] для арктических ВМ характерна наибольшая прозрачность воздуха, а для тропических – наибольшая замутненность. Кроме того, учитывались расположение основных промышленных центров региона, а также повторяемость различных траекторий. Таким образом, *первый сектор* (рис. 1) соответствует переносу арктических и умеренных ВМ, сформировавшихся над Северной Атлантикой и трансформировавшихся при передвижении над Европой и Западной Сибирью. Именно эти ВМ переносятся над промышленными районами Западной и Восточной Сибири.

Второй сектор включает в себя направления: западно-юго-западное, юго-западное, юго-юго-западное. Из этого сектора на территорию Восточной Сибири попадают умеренные, а летом и тропические ВМ, изначально формировавшиеся в районе Атлантики и трансформировавшиеся над субтропическими районами Европы и Средней Азии. Крупные антропогенные источники загрязнения в этом секторе находятся на значительном удалении от региона-рецептора. *Третий сектор* состоит из траекторий южного, юго-юго-восточного, юго-восточного, восточно-юго-восточного и восточного типов. По нашим данным, их повторяемость в Иркутске (и Листвянке) не превышает 4%. В Мондах повторяемость

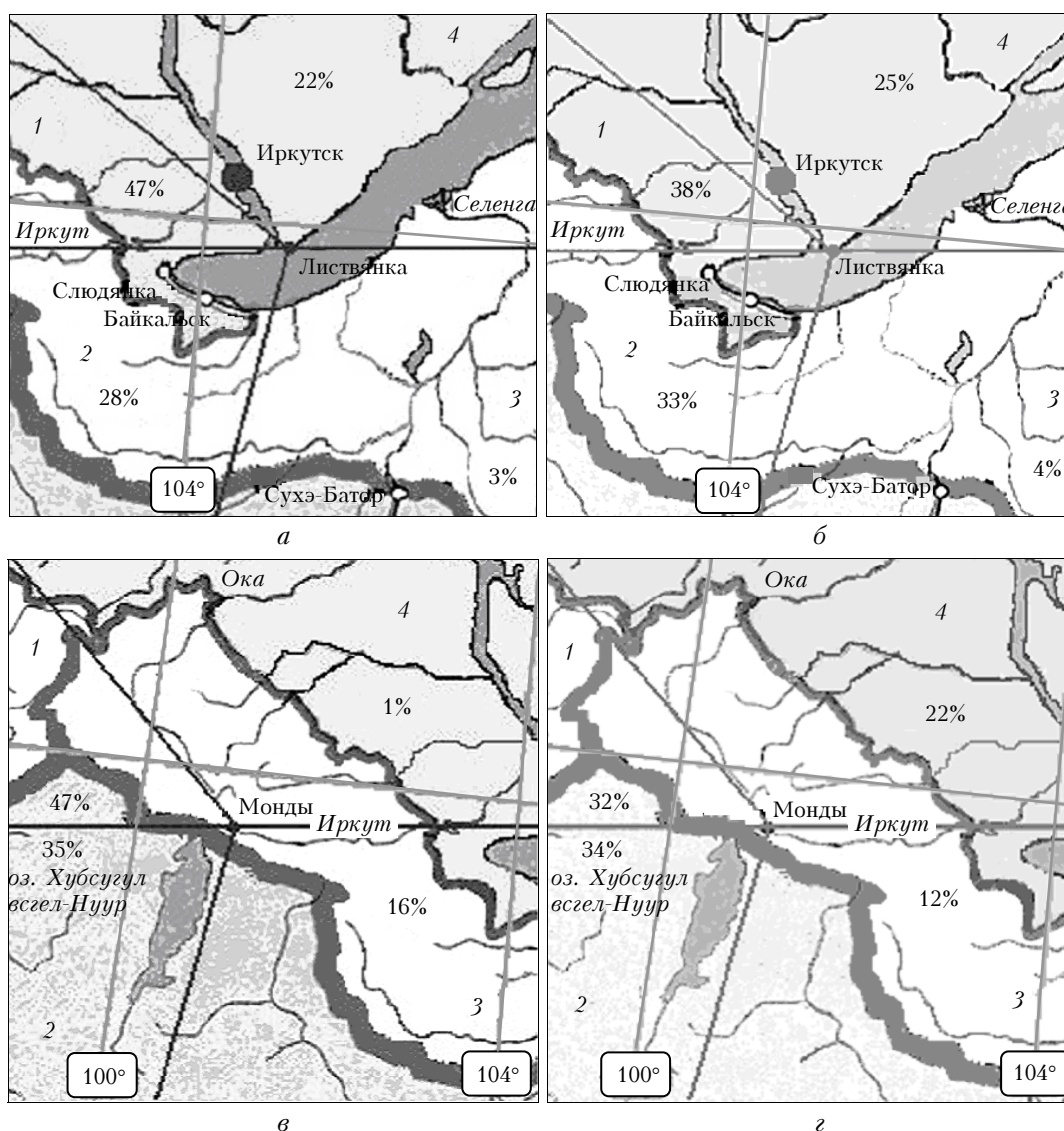


Рис. 1. Географическое зонирование для классификации траекторий воздушных масс: 1 – СЗ; 3-СЗ; 3; 2 – 3-ЮЗ; ЮЗ; Ю-ЮЗ; 3 – Ю; Ю-ЮВ; ЮВ; В-ЮВ; В; МЦ; 4 – В-СВ; СВ; С-СВ; С; С-СЗ. а – Иркутск, дни с осадками; б – Иркутск; в – Монды, дни с осадками; г – Монды

юго-восточных типов траекторий увеличивается до 12%. Это связано с влиянием хребтов Хамар-Дабана и Восточных Саян, экранирующих Иркутск от поступления ВМ с юго-востока. *Четвертый сектор* включает траектории, характерные для «ныряющих» циклонов, которые приносят на БПТ холодный арктический воздух, сформировавшийся над Северным Ледовитым океаном, а также северо-восточные траектории, которые возникают при развитии крупных антициклональных образований, формирующихся над территорией Восточной Сибири в зимнее время года.

Анализ проводился для всех имеющихся данных за исследуемый период – около 2500 случаев (рис. 1, б и г). Кроме того, отдельно проводился анализ траекторий для дней с осадками (около 750 случаев).

Очевидно, что в дни с осадками повторяемость северо-западных траекторий, характерных для тыловой части циклонов, существенно выше, чем для общего массива траекторий. Движение воздушных масс в безоблачные дни в этом случае не рассматривалось. Известно, что безоблачная погода присуща антициклональному типу погоды и часто сопровождается ветрами юго-восточного направления, либо ослабленным переносом воздушных масс, который в принятой типизации характеризуется как местные циркуляции (МЦ) [7, 8]. Анализ массива обратных траекторий для дней с осадками показал, что перенос воздушных масс с западного и северо-западного направления (первый сектор) достигает 47%, а в общем случае – 38%. При переносе воздушных масс из этого сектора химический состав аэрозолей и атмосферных осадков формируется под воздействием антропогенных выбросов юга Красноярского края и Иркутско-Черемховского промышленного района (см. рис. 1). Другим преобладающим направлением является юго-западное, повторяемость которого составляет 28 и 35% (второй сектор).

Факторный анализ

Идентификация источников загрязнения воздушной среды для данной точки-рецептора по результатам анализа химического состава АО или АА получила название «рецепторное моделирование» [9]. Рецепторное моделирование основано на современ-

ных статистических методах, таких как дисперсионный и факторный анализ [10–12]. Главными задачами факторного анализа являются: 1) сокращение числа переменных (редукция данных), 2) определение структуры взаимосвязей между переменными – классификация переменных. Факторы выделяются последовательно и содержат все меньше и меньше общей дисперсии (изменчивости), т.е. определяющим обычно является первый фактор. На первом этапе исследований для факторного анализа использовался стандартный пакет программ статистической обработки данных для Microsoft Windows Statistica for Windows (99 Edition).

На основе данных по химическому составу АО и АА для трех станций БПТ было выявлено 4 фактора (источника). *Первый* фактор значимо коррелирует с концентрациями ионов SO_4^{2-} , NO_3^- , NH_4^+ . *Второй* фактор определяется ионами Ca^{2+} , Mg^{2+} и HCO_3^- и только в отдельных случаях отмечается взаимосвязь с Na^+ , K^+ . *Третий* фактор связан с концентрациями ионов NO_3^- , Na^+ , K^+ , Cl^- , *четвертый*, как и первый, с SO_4^{2-} , NO_3^- , NH_4^+ . В исследованиях различных авторов [2, 13] первый фактор, как правило, связан с влиянием антропогенных источников, второй – с поступлением в атмосферу почвенных компонентов. Третий фактор, выделенный по данным наблюдений, характеризует влияние местных источников загрязнения. Четвертый фактор определяется только на ст. Монды и, вероятно, появляется в результате газофазных превращений в чистой атмосфере (табл. 1–3).

Таблица 1
Факторные нагрузки, полученные методом главных компонент для АА (ст. Монды)

Ион	Фактор		
	почвенный	газофазный	локальный
SO_4^{2-}	0,62	0,66	0,18
NO_3^-	-0,03	0,76	-0,06
Cl^-	0,09	0,14	0,95
NH_4^+	0,20	0,80	0,43
Na^+	0,88	0,01	-0,09
K^+	0,78	-0,09	0,37
Mg^{2+}	0,92	0,19	0,06
Ca^{2+}	0,86	0,28	0,14

Таблица 2

Факторные нагрузки и общности, полученные методом главных компонент для холодного периода (атмосферные осадки)

Ион	Фактор 1		Фактор 2		Фактор 3	Фактор 4	Общность		
	антропогенный		почвенный		локальный	газофазный			
	1*	2**	2**	3***	2**	3***	1*	2**	3***
HCO_3^-	0,84	0,25	0,79	0,93	-0,22	-0,01	0,81	0,86	0,94
SO_4^{2-}	0,91	0,84	0,30	0,44	0,20	0,77	0,97	0,94	0,92
NO_3^-	0,92	0,00	0,62	0,26	0,49	0,85	0,89	0,89	0,77
Cl^-	0,80	0,65	0,01	0,23	0,03	0,75	0,96	0,40	0,66
Na^+	0,85	0,07	0,51	0,75	0,88	0,34	0,97	0,53	0,83
K^+	0,74	0,01	0,08	0,70	0,84	0,41	0,74	0,47	0,80
Ca^{2+}	0,91	0,12	0,95	0,91	0,20	0,23	0,96	0,95	0,96
Mg^{2+}	0,93	0,21	0,66	0,76	0,50	0,47	0,95	0,82	0,78
NH_4^+	0,80	0,92	-0,02	0,09	-0,06	0,93	0,80	0,91	0,89

*Ст. Иркутск, **ст. Листвянка, ***ст. Монды.

Таблица 3

Факторные нагрузки и общности, полученные методом главных компонент для теплого периода (атмосферные осадки)

Ион	Фактор 1		Фактор 2			Общность		
	антропогенный		почвенный					
	1*	2**	1*	2**	3***	1*	2**	3***
HCO ₃ ⁻	-0,04	-0,16	0,95	0,94	0,81	0,95	0,99	0,96
SO ₄ ²⁻	0,78	0,82	0,44	0,51	0,63	0,94	0,98	0,93
NO ₃ ⁻	0,76	0,92	0,54	-0,13	0,67	0,90	0,86	0,79
Cl ⁻	0,90	0,59	0,17	0,55	0,61	0,96	0,88	0,58
Na ⁺	0,47	0,62	0,78	0,54	0,81	0,87	0,78	0,84
K ⁺	0,69	0,24	0,58	0,84	0,63	0,89	0,80	0,76
Ca ²⁺	0,64	0,50	0,74	0,81	0,90	0,99	0,99	0,91
Mg ²⁺	0,48	0,34	0,85	0,85	0,87	0,96	0,95	0,79
NH ₄ ⁺	0,88	0,44	0,08	0,59	0,76	0,93	0,95	0,96

*Ст. Иркутск, **ст. Листвянка, ***ст. Монды.

Результаты исследования

Анализ факторов (источников) атмосферных выпадений на ст. Монды

По результатам факторного анализа атмосферного аэрозоля (метод главных компонент – вращение факторов методом VARIMAX) на ст. Монды выделены три фактора (источника) (табл. 1, 4, 5). Для формирования химического состава атмосферных выпадений в этом районе определяющим является почвенный фактор. Второй (газофазный) фактор свя-

зан с процессами газофазных превращений и образованием вторичного аэрозоля (*in situ*) в атмосфере при дальнем переносе из второго или первого секторов (см. табл. 1). Отчетливо выделяется третий (локальный) фактор, включающий ионы Cl⁻, NH₄⁺ и K⁺. Максимум по этим компонентам связан с северо-восточным направлением воздушных масс.

Анализ траекторий переноса воздушных масс с учетом выявленных факторов (см. рис. 1) показал, что почвенный фактор превалирует при переносе воздушных масс из второго сектора (юго-западные районы Азии)

Таблица 4

Факторные нагрузки и общности, полученные методом главных компонент для холодного периода (атмосферный аэрозоль)

Ион	Фактор 1		Фактор 2	Фактор 3		Общность	
	антропогенный		почвенный	локальный			
	1*	2**	2**	1*	2**	1*	2**
HCO ₃ ⁻		0,04	0,91		0,17		0,87
SO ₄ ²⁻	0,95	0,82	0,03		0,31	0,90	0,77
NO ₃ ⁻	0,95	0,83	-0,10		-0,17	0,90	0,73
Cl ⁻	0,75	0,20	0,15		0,68	0,57	0,81
Na ⁺	0,78	0,01	0,04		0,99	0,61	0,97
K ⁺	0,52	-0,03	0,07		0,99	0,27	0,98
Ca ²⁺	0,87	0,59	0,27		-0,11	0,75	0,43
Mg ²⁺	0,89	0,44	0,19		0,13	0,79	0,25
NH ₄ ⁺	0,93	0,58	0,63		-0,06	0,87	0,74

*Ст. Иркутск, **ст. Листвянка.

Таблица 5

Факторные нагрузки и общности, полученные методом главных компонент для теплого периода (атмосферный аэрозоль)

Ион	Фактор 1		Фактор 2		Фактор 3		Общность	
	антропогенный		почвенный		локальный			
	1*	2**	1*	2**	1*	2**	1*	2**
HCO ₃ ⁻	-0,04	0,83	0,25	-0,02	0,86	0,09	0,81	0,70
SO ₄ ²⁻	0,87	0,67	0,21	0,36	0,09	-0,47	0,82	0,79
NO ₃ ⁻	0,66	0,93	0,36	0,18	-0,17	-0,15	0,58	0,92
Cl ⁻	0,85	0,10	-0,20	0,16	-0,05	0,96	0,76	0,96
Na ⁺	-0,13	0,04	0,59	0,83	0,44	0,24	0,55	0,75
K ⁺	0,03	0,38	0,13	0,82	0,87	-0,12	0,77	0,83
Ca ²⁺	0,33	0,51	0,88	0,67	0,07	0,02	0,88	0,70
Mg ²⁺	0,13	-0,06	0,89	0,58	0,37	0,01	0,93	0,33
NH ₄ ⁺	0,96	0,90	0,15	0,11	0,03	0,36	0,94	0,94

*Ст. Иркутск, **ст. Листвянка.

и при поступлении воздушных масс из третьего сектора (юго-восточные районы Азии). Суммарная повторяемость этих типов траекторий составляет 46%. Приходящие из первого сектора воздушные массы (32%) приносят АА, сформированные над промышленными районами юга Восточной Сибири (газофазный фактор). Происхождение солей в АА, связанное с локальным фактором, обычно сопряжено с воздушными массами, поступающими из четвертого сектора (22%).

По результатам факторного анализа химического состава атмосферных осадков (метод главных компонент, вращение факторов — методом VARIMAX) на ст. Монды выделены два фактора. Один из них характерен для холодного и теплого периодов и классифицирован как почвенный. Другой фактор наблюдается в основном в холодный период года и является результатом газофазных превращений в атмосфере. Газофазный фактор, как правило, определяется дальним переносом с территорий второго или первого секторов (см. табл. 2, 3).

Анализ факторов (источников) атмосферных выпадений в г. Иркутске

Статистический анализ результатов химического состава АА и АО в районе г. Иркутска показал, что определяющим фактором их формирования как в холодный, так и в теплый период года являются локальные антропогенные источники выбросов. Однако в теплый период года возможно выделение второго фактора — почвенного (см. табл. 3, 5). Снижение интенсивности работы топливно-энергетического комплекса, сход снежного покрова, усиление турбулентности и процессов конвекции в атмосфере способствуют росту эмиссии пылевидного терригенного материала в атмосферу. При анализе химического состава АО, выпадающих в районе промышленного центра, отмечается влияние переноса воздушных масс на формирование состава дождевой воды с территории Казахстана (юго-западные траектории).

Анализ факторов (источников) атмосферных выпадений на ст. Листвянка

Воздушная среда на ст. Листвянка подвергается влиянию выбросов близлежащих промышленных комплексов, а также воздействию крупного водоема. В холодный период года одним из основных факторов при формировании химического состава аэрозолей, атмосферных выпадений является антропогенный фактор (см. табл. 2, 4). Об этом свидетельствуют значимые величины факторных нагрузок для концентрацией SO_4^{2-} , NO_3^- , NH_4^+ и Ca^+ . Не менее значимым является и почвенный фактор. В теплый период воздействие почвенного фактора значительно выше антропогенного.

В районе этой станции выделяется также локальный фактор формирования химического состава атмосферных выпадений. Значимые величины определены для концентраций таких ионов, как Na^+ , K^+ , NO_3^- и Cl^- (см. табл. 2, 4, 5), в зимний и летний периоды. Зимой локальный фактор, предположи-

тельно, связан с воздушными массами, приходящими с территории сектора 3 (см. рис. 1) и расположенными в этом секторе источниками. Компоненты антропогенного происхождения формируют состав АО с территории первого сектора, почвенного — с территории четвертого сектора.

Заключение

Таким образом, анализ зависимости химического состава атмосферных осадков и атмосферных аэрозолей от направления движения воздушных масс в пунктах наблюдения (Иркутск, Листвянка, Монды) БПТ дает возможность оценить роль природных и антропогенных источников в формировании состава атмосферных примесей на БПТ. В г. Иркутске доминирующими источниками примесей в атмосфере являются локальные антропогенные выбросы, в теплый период увеличивается вклад терригенных источников. Ведущая роль в формировании антропогенных примесей обусловлена топливно-энергетическим комплексом, что проявляется в величинах факторных нагрузок концентраций сульфат-иона в промышленном центре в течение всех сезонов года.

На побережье оз. Байкал (п. Листвянка), находящемся в зоне влияния выбросов промышленного центра, антропогенный фактор является наиболее значимым в течение отопительного сезона при северо-западных траекториях воздушных масс. Почвенный фактор становится определяющим в химическом составе аэрозолей и осадков как в теплый, так и в холодный периоды года преимущественно при южных направлениях переноса ВМ. В районе п. Листвянка выделяется значимый вклад локального фактора, индикатором которого может служить хлорид-ион.

Химический состав атмосферных аэрозолей, осадков в районе фоновой станции Монды на БПТ определяется, в основном, естественными факторами, включающими в себя как локальные источники, так и примеси, сформировавшиеся в атмосфере в результате дальнего переноса.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 05-05-97233р_байкал_а).

1. Ходжер Т.В., Голобокова Л.П., Оболкин В.А., Потемкин В.Л., Нецветаева О.Г. Межсезонная и сезонная изменчивость ионного состава атмосферных аэрозолей на юге Восточной Сибири // Оптика атмосфер. и океана. 1997. Т. 10. № 6. С. 650–655.
2. Plaisance H., Galloo J.C., Guillermo R. Source identification and variation in the chemical composition of precipitation at two rural sites in France // Sci. Total Environ. 1997. V. 206. P. 79–93.
3. Zeng Y., Hopke P.K. Comparison of the source locations and seasonal patterns for acidic species in precipitation and ambient particles in southern Ontario, Canada // Sci. Total Environ. 1994. V. 143. P. 245–260.
4. Draxler R.R. The calculation of low-level winds from the archived data of a regional primitive equation model // J. Appl. Meteorol. 1990. V. 29. P. 240–248.
5. Ходжер Т.В. Исследование состава атмосферных выпадений и их воздействия на экосистемы Байкальской природной территории: Автореф. дис. ... докт. геогр. наук. М.: Ин-т географии РАН, 2005. 42 с.

6. *Матвеев Л.Т.* Курс общей метеорологии. Физика атмосферы. Л.: Гидрометеониздат, 1984. 751 с.
7. *Мячкова Н.А.* Климат СССР. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1983. 193 с.
8. *Зверев А.С.* Синоптическая метеорология. Л.: Гидрометеониздат, 1977. 711 с.
9. *Gordon G.E.* Receptor models. Critical review // Environ. Sci. and Technol. 1988. V. 22. N 10. P. 1132–1142.
10. *Qin Y., Oduyemi K.* Atmospheric aerosol source identification and estimates of source contributions to air pollution in Dundee, UK // Atmos. Environ. 2003. V. 37. P. 1799–1809.
11. *Watson J.G., Chow J.C., Fujita E.M.* Review of volatile organic compound source apportionment by chemical mass balance // Atmos. Environ. 2001. V. 35. P. 1567–1584.
12. *Huang S., Rahn K.A., Arimoto R.* Testing and optimizing two factor-analysis techniques on aerosol at Narragansett, Rhode Island // Atmos. Environ. 1999. V. 33. P. 2169–2185.
13. *Смоляков Б.С., Шинкоренко М.П.* Сопоставление полного состава атмосферных аэрозолей, отбравшихся одновременно в разных точках Западной Сибири // Оптика атмосф. и океана. 2002. Т. 15. № 5–6. С. 441–449.

E.V. Chipanina-Molozhnikova, L.P. Golobokova, E.V. Kuchmenko, O.G. Netsvetaeva, T.V. Khodzher.
Conditions for formation of chemical composition of atmospheric aerosols and precipitations over the Baikal nature territory.

The data on chemical composition of atmospheric aerosols (AA) and atmospheric precipitation (AP) were analyzed to identify the sources of aerosols coming to the Baikal nature territory. Irkutsk is supposed to be a typical industrial center in Eastern Siberia, the station of Mondy is taken as a background, and the station of Listvyanka represents a rural settlement influenced by a large industrial center. The factor analysis of the AA and AP composition was used to identify the main sources (factors) of atmospheric pollutants. Four main factors were distinguished for the points at issue: soil, gas-phase, anthropogenic, and local. The role and composition of the factors vary for aerosols and precipitation. Using the statistic methods (STATISTICA software package) cyclic (seasonal) components of observational series were determined and interrelations between chemical composition of aerosols and precipitation at the point of observation were estimated. The role of advective (circulation) factor was assessed taking into account four geographical groups of air mass transfer trajectories that were identified before.

The anthropogenic sources were studied totally. Further it is planned to reveal the contributions of mobile sources (vehicles), energy, and other industrial facilities.