

Л.П. Голобокова¹, И.В. Латышева², В.И. Мордвинов³, Т.В. Ходжер¹,
В.А. Оболкин¹, В.Л. Потемкин¹

Особенности химического состава атмосферного аэрозоля на фоне экстремальных погодных условий на юге Сибири

¹ Лимнологический институт СО РАН, г. Иркутск

² Иркутский государственный университет

³ Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск

Поступила в редакцию 1.03.2005 г.

Южные районы Прибайкалья, высокогорные районы Восточных Саян и оз. Байкал находятся на стыке влияния северных и южных синоптических процессов. Климатические изменения здесь выражены наиболее ярко. На основе натурных наблюдений показаны изменения химического состава растворимой фракции атмосферного аэрозоля в экстремальные по погодным условиям периоды 2001 и 2002 гг. в зависимости от характера синоптических процессов.

Введение

В последние десятилетия в различных регионах земного шара возросла повторяемость крупных аномалий метеорологических параметров, которые связывают с экстремальными стадиями динамики синоптических процессов [1].

Характер синоптических процессов в умеренных широтах северного полушария во многом определяется частотой, длительностью и мощностью заточек континентального арктического воздуха в тылу циклонов, развивающихся в передней части высотных ложбин, и интенсивностью адвекции теплого воздуха, преимущественно в передней части высотного гребня, ориентированного с юга [2].

В тесном взаимодействии с синоптическими процессами в атмосфере протекают сложные химические реакции. На основе фотохимической модели средней атмосферы, разработанной в Институте энергетических проблем химической физики РАН, изучается роль химических процессов в глобальном потеплении климата в XXI в. [3]. Подобные результаты описаны и в других работах [4, 5]. Значительно меньше опубликовано работ по изучению влияния климатических изменений на химический состав атмосферы в различных урбанизированных и фоновых районах земного шара.

Большой объем натурных измерений в системе мониторинга атмосферного аэрозоля на территории Западной и Восточной Сибири в рамках проекта «Аэрозоли Сибири», начатого в 1991 г., существенно расширил представления о химическом составе атмосферного аэрозоля и возможном его влиянии на изменение климата в Сибири [6–9].

Южные районы Байкальского региона, высокогорные районы Восточных Саян и хребта Хамар-Дабан, оз. Байкал находятся на стыке взаимодейст-

вия разнородных воздушных масс, поэтому климатические изменения здесь выражены наиболее ярко и наглядно отражены в межгодовой динамике температуры воздуха (рис. 1).

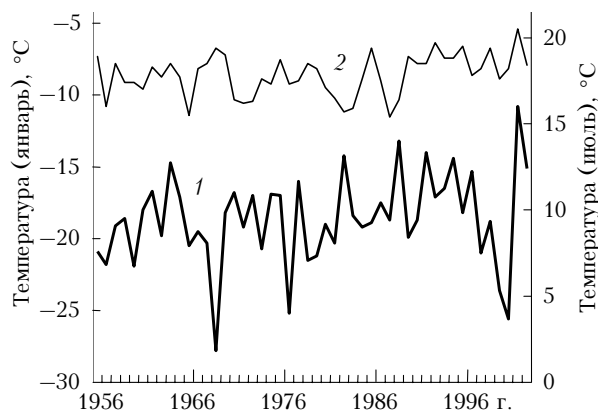


Рис. 1. Многолетний ход средней температуры воздуха в Иркутске в январе (1) и июле (2)

Целью данной работы явилось исследование условий формирования химического состава атмосферного аэрозоля на фоне экстремальных погодных условий на юге Сибири в теплый период 2001 и 2002 гг.

Материал и методы исследования

Проведено исследование химического состава растворимой фракции атмосферного аэрозоля на трех станциях мониторинга Байкальского региона (Иркутск, Листвянка, Монды) в период 2000–2004 гг. Для анализа состава растворов применялись современные методы: высокоэффективная жидкостная хроматография, атомная абсорбция, спектрофотометрия [10–13]. Достоверность полученных результатов проверялась сведением баланса суммарного содержа-

ния эквивалентных концентраций анионов и катионов, погрешность которых не превышала 5–10%, а также регулярным участием в международных интеркалибрациях по контролю качества анализов [14, 15]. Исследованы синоптические процессы в теплый период года над территорией Байкальского региона по ежедневным синоптическим картам (приземным и высотным) за 2000–2004 гг., и рассчитана их повторяемость в летние месяцы 2001–2002 гг., существенно различающиеся по погодным условиям и химическому составу атмосферных примесей.

Результаты исследования

Исследование синоптических процессов в теплый период 2000–2004 гг. показало, что летом в южных районах Байкальского региона за счет большего прихода солнечной радиации происходят повышение высот геопотенциальных поверхностей в слое 1000–500 гПа и смещение ложбин циркумполярного вихря к полюсу. Основная барическая ложбина высотного циклона обычно ориентирована на Среднесибирское плоскогорье, а вторая, более плоская, — на Чукотку и дальневосточные моря (чаще на Берингово море). Южные районы Байкальского региона в 55% случаев оказываются под влиянием высотного гребня (рис. 2), где в 65% случаев осуществляется вынос теплых воздушных масс с юга и юго-запада в тыловой части и по оси высотного гребня.

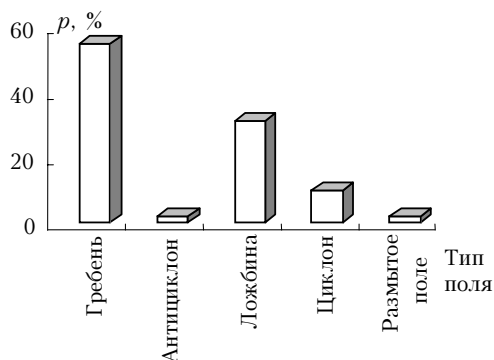


Рис. 2. Повторяемость (%) типов высотного поля (H_{700}) на юге Байкальского региона в теплый период 2000–2004 гг.

В 31% случаев исследуемая территория попадает под влияние высотных ложбин, ориентированных с районов Хатанги или Якутии, где в 74% случаев в южные районы Сибири поступает более холодный воздух с севера в тыловой части и по оси высотной ложбины. На высоте ведущего потока господствующими являются западные ветры (31,4%) и по 29% случаев приходится на меридиональные северо-западные и юго-западные потоки.

У поверхности Земли (рис. 3) частое влияние тыловой части высотного гребня, его оси, передней части и оси высотной ложбины (59%) с наблюдаемыми динамическими факторами падения давления обуславливает господствующее поле пониженного давления (44%), для которого в 32% случаев характерно прохождение холодных атмосферных фронтов, сопровождающихся процессами облако- и осадкообразования. Динамические факторы роста давления, наблюдаемые в тыловой части высотных ложбин и передней части высотного гребня, в 35% случаев способствуют формированию приземного поля повышенного давления с характерными нисходящими потоками, приводящими к размыванию облачности и осадков.

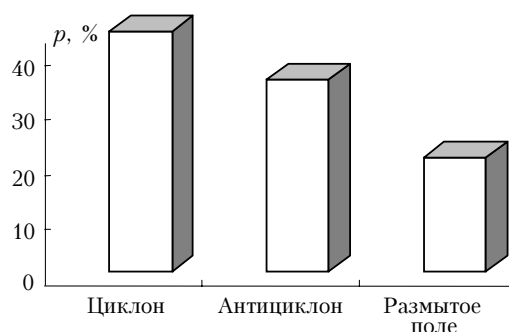


Рис. 3. Повторяемость (%) типов приземного барического поля на юге Байкальского региона в теплый период 2000–2004 гг.

На фоне синоптических процессов 2000–2004 гг. химический состав аэрозоля в промышленном центре (Иркутск) формировался под действием общих для всех современных урбанизированных районов источников — энергетики, автотранспорта, промышленных предприятий. Особенностью химического состава растворимой фракции аэрозоля района Иркутска являлась повторяемость суммарных массовых концентраций ионов, которая в 67% случаев была ниже среднего многолетнего значения, равного $7,1 \text{ мкг/м}^3$ за период 2000–2004 гг. В п. Листвянка, где нет собственных мощных источников загрязнения атмосферы, среднее многолетнее содержание суммы ионов в аэрозоле составляло $5,4 \text{ мкг/м}^3$, что ниже, чем в г. Иркутске. 59% определений приходилось на величины до $5,0 \text{ мкг/м}^3$. На ст. Монды основным источником атмосферного аэрозоля является терригенный материал. При средней многолетней суммарной концентрации ионов $1,4 \text{ мкг/м}^3$ около 65% определений ниже этой величины. На всех станциях главными ионами в химическом составе аэрозоля являлись ионы SO_4^{2-} и NH_4^+ (табл. 1).

Таблица 1

Средние концентрации ионов в атмосферном аэрозоле на станциях мониторинга Байкальского региона за период 2000–2004 гг., мкг/м^3

Станция	HCO_3^-	SO_4^{2-}	NO_3^-	Cl^-	NH_4^+	Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	Сумма ионов
Иркутск	1,02	2,83	0,99	0,27	1,04	0,14	0,21	0,09	0,46	7,1
Листвянка	0,69	2,35	0,46	0,33	0,88	0,20	0,24	0,05	0,22	5,4
Монды	0,19	0,64	0,09	0,06	0,21	0,04	0,07	0,01	0,08	1,4

В эквивалентном отношении среди анионов основной в химическом составе аэрозоля г. Иркутска была концентрация сульфат-ионов со средним содержанием 25 %-экв/м³. В абсолютных значениях изменение концентраций ионов SO₄²⁻ колебалось от аналитического нуля до 21,0 мкг/м³. Наиболее высокие концентрации этого иона отмечались в холодный период года. Не менее значительный вклад в ионный состав аэрозоля вносили концентрации иона HCO₃⁻, средняя относительная концентрация которых равна 11 %-экв/м³. Максимальное содержание ионов HCO₃⁻ наблюдалось в 2000 и 2004 гг. Немаловажную роль в составе анионов представляли концентрации ионов NO₃⁻, при средней относительной концентрации 7 %-экв/м³. Наибольший их вклад в суммарную концентрацию ионов аэрозоля отмечен в период с июля по декабрь 2002 г. Среди катионов в составе аэрозоля приоритетными были концентрации ионов аммония (27 %-экв/м³) и кальция (12 %-экв/м³).

В химическом составе атмосферного аэрозоля района Листвянки относительное содержание ионов SO₄²⁻ и NH₄⁺, выше, чем в Иркутске, и составляет в среднем 33 и 31 %-экв/м³ соответственно. В целом химический состав аэрозоля на ст. Листвянка в относительных единицах являлся более стабильным, чем в г. Иркутске, что может указывать на постоянные факторы, участвующие в формировании химического состава воздушной среды юго-западного побережья оз. Байкал.

В высокогорных районах Восточного Саяна формирование химического состава аэрозоля происходило за счет естественных источников в основном почвенно-эрозионного и биологического происхождения. На ст. Монды в суммарной концентрации ионов аэрозоля наряду с высоким содержанием ионов SO₄²⁻ (32 %-экв/м³) и NH₄⁺ (29 %-экв/м³) отмечалась значимая доля концентраций ионов HCO₃⁻ и Ca²⁺ — по 9 %-экв/м³.

В теплый период величина относительной концентрации ионов NH₄⁺ снижалась, содержание ионов терригенного происхождения Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺ и K⁺ возрастало. На всех станциях в распределении суммарной концентрации ионов выделено по три максимума. Первый из них наблюдался в январе — марте, когда накопление примесей в атмосфере происходило на фоне низких температур воздуха и невысоких скоростей ветра. Второй максимум на ст. Монды и Иркутск соответствовал весеннему периоду: апрель — первая половина июня, когда при интенсивном притоке солнечной радиации усиливались турбулентный теплообмен и процессы конвекции в атмосфере. При этом на ст. Монды второй максимум концентраций ионов был обычно выше, чем в холодный период года. В Листвянке

второй пик в распределении концентраций ионов прослеживался в июле и вызван некоторым ослаблением ветра на Байкале в условиях местного антициклогенеза. Третий максимум суммы ионов на всех станциях отмечался осенью (сентябрь—ноябрь), когда вновь активизировались процессы циклогенеза при перестройке барического поля у Земли с летнего типа на зимний.

В целом пространственная неоднородность, сезонная изменчивость, а также химический состав растворимой фракции аэрозоля на станциях мониторинга Байкальской природной территории соответствовали таковым для многолетнего ряда наблюдений [16]. Однако в межгодовой динамике этих параметров отмечались существенные различия. Наиболее значимые отклонения в количественном и качественном составе растворимой фракции атмосферного аэрозоля наблюдались в летние периоды 2001 и 2002 гг. В данной работе не рассматриваются химические параметры аэрозоля в аномальный по экологической ситуации 2003 г., когда влияние обширных лесных пожаров, несомненно, отразилось на химическом состоянии атмосферы.

В 2001 г., при более низких температурах воздуха, суммарные концентрации ионов были повышены, особенно в первой половине лета (рис. 4), по сравнению с результатами исследований длинного ряда наблюдений (1993—2000 гг.). Отмечено, что в отдельные периоды исследования значительный вклад в ионный состав вносят концентрации гидрокарбонат-иона (до 36 %-экв/м³), хлорид-иона (до 25 %-экв/м³), иона кальция (до 35 %-экв/м³). В годовом аспекте 2002 г. при более высоких температурах воздуха по сравнению с 2001 г. суммарная массовая концентрация ионов в атмосферном аэрозоле на ст. Иркутск и Листвянка была ниже средних многолетних значений, а в период с апреля по октябрь близка к значениям фоновой ст. Монды. Наиболее часто встречаемыми концентрациями в течение года оказались следующие: в Иркутске 1,0—2,5 (до 75% определений), Листвянке 1,0—4,0 (до 50%), Мондах 0,1—1,4 мкг/м³ (до 80%). В составе ионов отмечается значительный рост, особенно в летний период, доли нитрат-иона (до 16 %-экв/м³).

В ходе исследований были выделены периоды наблюдений, когда различия в химическом составе аэрозоля 2001 и 2002 гг. наиболее экстремальны и отличаются от средних многолетних наблюдений (табл. 2).

В дальнейшем были исследованы аэросиноптические условия периодов формирования повышенных и пониженных значений суммарных концентраций ионов в атмосферном аэрозоле. По характеру синоптические процессы летних месяцев 2001 г. резко отличались от процессов летнего периода 2002 г.

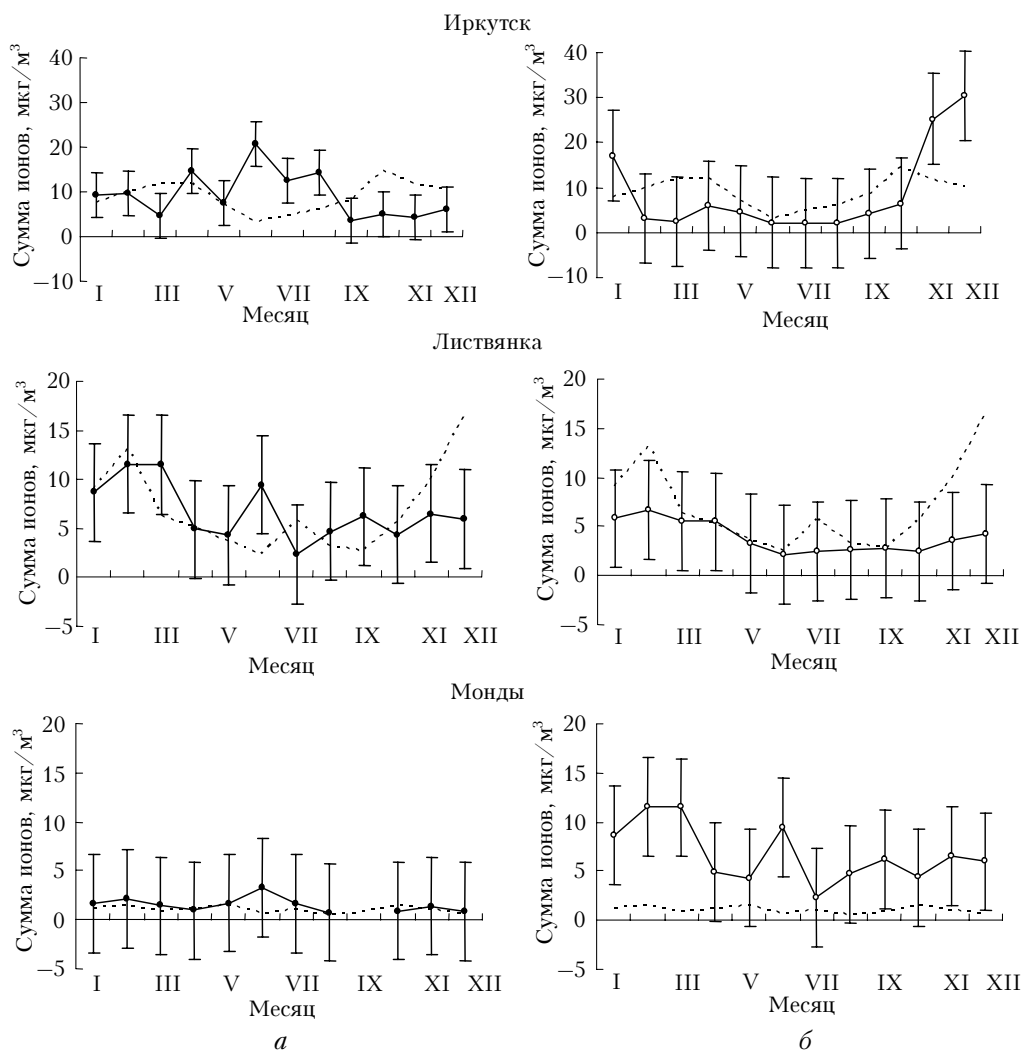


Рис. 4. Годовой ход суммарного содержания ионов в атмосферном аэрозоле на станциях мониторинга Байкальского региона, мкг/м³: а – 2001 г., б – 2002 г.; --- – среднее многолетнее за период 1993–2000 гг.

Таблица 2

Экстремальные значения суммарной массовой концентрации ионов в аэрозоле в летние периоды 2001 и 2002 гг. на станциях мониторинга Байкальского региона, мкг/м³

Станция	Период отбора	Сумма ионов, мкг/м ³	Средняя многолетняя величина суммы ионов (летний период), мкг/м ³
Иркутск	28.06.01–09.07.01	31,6	6,2
	24.06.02–01.07.02	1,5	
Листвянка	20.06.01–02.07.01	21,3	4,8
	20.06.02–30.06.02	1,1	
Монды	24.06.01–03.07.01	3,3	1,2
	15.06.02–01.07.02	1,0	

Таблица 3

Повторяемость (%) типов приземного барического поля на юге Прибайкалья 20.06–10.07.2001 г. и 20.06–10.07.2002 г.

Год	Тип барического поля		
	циклональный	антициклональный	размытое барическое поле
2001	39	52	9
2002	31	26	43

Летом 2001 г. территория юга Прибайкалья (табл. 3) часто находилась под влиянием тыловой части, оси и южной периферии высотной ложбины

(39%), а динамические факторы способствовали длительному сохранению у поверхности Земли поля повышенного давления (52%) и интенсивному

Особенности химического состава атмосферного аэрозоля на фоне экстремальных погодных условий...

691

прогреву приземного слоя атмосферы, когда средние месячные температуры воздуха оказались на 3,7 °С выше среднееголетних значений [17].

При господствующих на высотах (рис. 5) северо-западных и западных потоках (80%) воздушные массы, смещаясь над промышленными районами Красноярского края и Иркутской области, обогащались частицами антропогенного происхождения и в дальнейшем с нисходящими потоками в антициклоне привели к росту суммарного содержания ионов в атмосферном аэрозоле на станциях мониторинга Байкальского региона летом 2001 г.

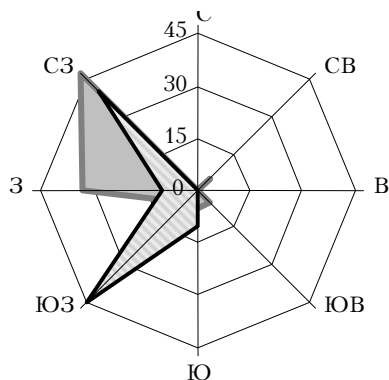


Рис. 5. Повторяемость (%) направлений ведущего потока на высоте 3–5 км на юге Байкальского региона 20.06–10.07.2001 г. (серое поле) и 20.06–10.07.2002 г. (заштрихованное поле)

В химическом составе аэрозоля возросла относительная доля концентраций ионов аммония, калия, натрия, сульфат-, нитрат- и хлорид-ионов. На единый источник атмосферного аэрозоля в этот период указывают высокая степень корреляционной связи между концентрациями иона аммония и нитрат-иона ($r = 0,78$), сульфат-иона ($r = 0,74$) и меньшая связь с концентрацией хлорид-иона ($r = 0,59$). В начале июля в Прибайкалье началось выпадение обильных атмосферных осадков, что привело к быстрому вымыванию этих ионов из атмосферы. В результате суммарная массовая концентрация ионов снизилась с 31,6 до 1,8 в Иркутске, с 21,7 до 1,7 в Листвянке и с 3,2 до 1,6 мкг/м³ в Мондах.

Ранние исследования по определению вклада крупномасштабных факторов в изменение химического состава водорастворимой фракции аэрозоля по более длинному ряду наблюдений показали, что на высокогорной станции Монды концентрации ионов щелочных и щелочноземельных металлов возрастают при южных и юго-восточных потоках, ориентированных с Монголии, а повышенное содержание сульфат- и нитрат-ионов связано с зональным и меридиональным переносом воздушных масс при выходе на территорию Восточных Саян антициклонов и циклонов по полярным и ультраполярным траекториям. В промышленных районах юга Восточной Сибири и на западном побережье оз. Байкал высокое содержание иона аммония, сульфат- и нитрат-иона летом связано с крупномасштабным меридиональным переносом воздуш-

ных масс, где поступающие на территорию Прибайкалья и Восточных Саян частицы обогащаются оксидами азота и серы при длительном смещении (порядка нескольких суток) над промышленными районами Сибири.

В выделенные периоды наиболее близким к средним климатическим показателям оказался теплый период 2002 г., когда южные районы Прибайкалья часто (35%) находились под влиянием тыловой части и оси высотного гребня, ориентированного с Монголии и высокогорий Восточных Саян, а динамические факторы способствовали длительному стационариванию у Земли области пониженного давления (74%) (см. табл. 3).

Удаленность высокогорных районов Восточных Саян и территории Монголии от промышленного воздействия при господствующих на высотах летом 2002 г. ветрах южной четверти (см. рис. 5), скорее всего, явилась причиной низкого суммарного содержания ионов в атмосферном аэрозоле преимущественно местного происхождения.

Развитие восходящих токов в области пониженного давления могло способствовать притоку нитрат-ионов, основными источниками которых летом служат почвенный покров (Монды) и выхлопы наземного транспорта (Иркутск, Листвянка). Этим можно объяснить рост их относительных концентраций на фоне низкого содержания сульфат-ионов при малой суммарной концентрации ионов в атмосферном аэрозоле в теплый период 2002 г.

Таким образом, проведенные исследования показали, что химический состав атмосферного аэрозоля существенно зависит от характера синоптических процессов, наиболее различающихся в аномально теплые и холодные годы. Увеличение суммарной массовой концентрации ионов в атмосферном аэрозоле, скорее всего, связано с развитием подвижных барических образований, способствующих обогащению его техногенными частицами при смещении над промышленными центрами Сибири. Длительное стационаривание однородной воздушной массы при блокирующих процессах над Европой, Атлантикой и Монголией является причиной низкого содержания атмосферного аэрозоля на юге Сибири.

Авторы выносят благодарность за данные ежедневных метеорологических наблюдений 2001–2002 гг., предоставленные Иркутским территориальным управлением по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды.

Работа выполнена по теме 24.3.3 и при поддержке интеграционного гранта № 64.

1. Сазонов Б.И. Суровые зимы и засухи. Л.: Гидрометеоздат, 1991. 240 с.
2. Курбаткин Г.П., Дегтярев А.И., Короткова Е.А. Об определении межсезонной эволюции некоторых аномалий общей циркуляции атмосферы // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2004. Т. 40. № 5. С. 586–592.
3. Ларин И.К., Угаров А.А. Климатический прогноз на 2000–2100 годы. II. Роль атмосферных химических процессов в изменении климата // Хим. физ. 2003. Т. 22. № 4. С. 21–28.

4. Seinfeld J.H., Carmichael G.R., Arimoto R., et al. ACE-ASIA – Regional climatic and atmospheric chemical effects of Asian dust and pollution // Bull. Amer. Meteorol. Soc. 2004. V. 85. N 3. P. 367.
5. Wang C., Prinn R.G., Sokolov A.A. Global interactive chemistry and climate model: Formulation and testing // J. Geophys. Res.-Atmosph. D. 1998. V. 103. N 3. P. 3399–3417.
6. Куценогий К.П., Куценогий П.К. Аэрозоли Сибири. Итоги семилетних исследований // Сиб. экол. ж. 2000. Т. VII. № 1. С. 11–20.
7. Ходжер Т.В., Голобокова Л.П., Оболкин В.А., Потемкин В.Л., Нецветаева О.Г. Межсезонная и сезонная изменчивость полного состава атмосферных аэрозолей на юге Восточной Сибири // Оптика атмосф. и океана. 1997. Т. 10. № 6. С. 650–655.
8. Ходжер Т.В., Потемкин В.Л., Голобокова Л.П., Оболкин В.А., Нецветаева О.Г. Станция «Монды» как фоновая станция для изучения переноса загрязняющих веществ в нижней атмосфере Прибайкалья // Оптика атмосф. и океана. 1998. Т. 11. № 6. С. 636–639.
9. Белан Б.Д., Рассказчикова Т.М., Симоненков Д.В., Толмачев Г.Н. Мезомасштабные различия в химическом составе атмосферного аэрозоля // Оптика атмосф. и океана. 2001. Т. 14. № 4. С. 322–326.
10. РД 52. 24. 383-95. Методические указания. Методика выполнения измерений массовой концентрации аммиака и ионов аммония в водах фотометрическим методом с реактивом Несслера. Ростов-на-Дону, 1995. 18 с.
11. ИСО 7890-86 Качество воды. Определение кальция и магния. Атомно-абсорбционный спектрометрический метод. М., 1987. 6 с.
12. ИСО 9964-3-93 Качество воды. Определение содержания натрия и калия спектрометрическим методом эмиссии в пламени. М., 1993. 12 с.
13. Барам Г.И., Верещагин А.Л., Голобокова Л.П. Микроколоночная высокоэффективная жидкостная хроматография с УФ-детектированием для определения анионов в объектах окружающей среды // Ж. анал. химии. 1999. Т. 54. № 9. С. 962–965.
14. Manual for sampling and chemical analysis. ЕМЕР/ССС– Report 1/95/ 0–7726/ June 1995. 176 p.
15. Ходжер Т.В., Голобокова Л.П., Нецветаева О.Г. Результаты тестирования химических параметров искусственных стандартных образцов дождей и пресных поверхностных вод // Оптика атмосф. и океана. 2004. Т. 17. № 5–6. С. 478–482.
16. Голобокова Л.П. Разработка и реализация методик для исследования химического состава газовых примесей и атмосферного аэрозоля (на примере Байкальской природной территории): Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Барнаул, 2004. 19 с.
17. Климат Иркутска // <http://www.icc.ru/wx/climat.htm>

L.P. Golobokova, I.V. Latysheva, V.I. Mordvinov, T.V. Khodzher, V.A. Obolkin, V.L. Potemkin.
Peculiarities in the chemical composition of atmospheric aerosol against background of extreme weather conditions in Southern Siberia.

Both the southern and northern synoptic processes affect Lake Baikal, the southern Baikal regions, and high-mountain areas of Eastern Sayan. As a result, the climatic changes are the most pronounced in these regions. Based on the data of 2001–2002 field observations, changes in the chemical composition of soluble fraction of atmospheric aerosol depending on the character of synoptic processes are shown for extreme weather conditions.