

Результаты исследований аэрозольной оптической толщи атмосферы в Байкальском регионе

А.С. Заяханов¹, Г.С. Жамсуева¹, С.А. Нагуслаев¹, В.В. Цыдыпов¹,
С.М. Сакерин², Д.М. Кабанов², М.А. Тащилин^{3*}

¹Отдел физических проблем Бурятского научного центра СО РАН
670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 8

²Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

³Институт солнечно-земной физики СО РАН
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 126а, а/я 291

Поступила в редакцию 25.01.2010 г.

Проведен анализ вариаций аэрозольной оптической толщи атмосферы в г. Улан-Удэ по результатам четырехлетних наблюдений (2006–2009 гг.) с помощью солнечного фотометра SP-7. Обсуждаются сезонные особенности спектральных зависимостей аэрозольной оптической толщи и общего влагосодержания атмосферы. Обнаружено, что в отличие от большинства станций, находящихся на территории Сибири, характерным для г. Улан-Удэ является высокое аэрозольное замутнение атмосферы в зимний период. Приводятся сравнения средних спектральных зависимостей аэрозольной оптической толщи и общего влагосодержания атмосферы в г. Улан-Удэ с измерениями на берегу оз. Байкал (ст. Боярск) и на других станциях азиатской части России.

Ключевые слова: аэрозольная оптическая толщина, интегральное влагосодержание, сезонные особенности; aerosol optical thickness, columnar water vapor, seasonal features.

Введение

Вариации прозрачности атмосферы оказывают существенное влияние на потоки солнечного излучения, приходящего к земной поверхности. Вклад аэрозольной составляющей в прозрачность атмосферы значительно варьирует в зависимости от географического положения, метеорологических факторов, характера подстилающей поверхности, влияния природных и антропогенных источников поступления аэрозоля в атмосферу. В связи с этим важную роль в понимании закономерностей изменчивости аэрозольного замутнения атмосферы играют регулярные сетевые наблюдения прозрачности атмосферы в различных регионах земного шара. В наибольшей степени современным требованиям единообразия измерений и глобального охвата отвечает сеть AERONET (<http://aeronet.gsfc.nasa.gov>), созданная на базе Sun-Sky фотометров CE-318 (www.cimel.fr).

Благодаря сотрудничеству нескольких институтов СО, ДВО и УрО РАН, в последнее десятилетие были организованы систематические измерения характеристик аэрозоля атмосферной толщи на территории Сибири и Дальнего Востока с использованием

фотометров CE-318 [1] и многоволновых фотометров SP-6(7), разработанных в ИОА СО РАН [2]. Наблюдения на региональной фотометрической сети дали материал для изучения пространственно-временной изменчивости радиационно-активных компонентов атмосферы (аэрозоль, водяной пар) на большой территории, где такие исследования ранее не проводились или были получены лишь эпизодические данные. К таким районам можно отнести и регион оз. Байкал [3].

Первые результаты о прозрачности атмосферы в регионе оз. Байкал, полученные по наблюдениям на трех актинометрических станциях [4, 5], свидетельствуют в целом о малом замутнении атмосферы при наличии пространственных неоднородностей на различных станциях, разнесенных вдоль береговой зоны акватории озера. Позднее регулярные актинометрические наблюдения на станциях были прекращены, несмотря на важную роль таких исследований в изучении климата и экосистемных изменений в районе оз. Байкал.

В данной статье представлены результаты исследований вариаций аэрозольной оптической толщи (АОТ) и общего влагосодержания атмосферы (ОВС) в период с 2005 по 2009 г. в нескольких районах Байкальского региона — г. Улан-Удэ, ст. Боярск, ст. Торы. В г. Улан-Удэ и на ст. Торы наблюдения осуществлялись регулярно и круглогодично за исключением периодов калибровки, а на ст. Боярск — эпизодически в периоды летних экспедиций. В г. Улан-Удэ и ст. Боярск в измерениях использовался сол-

* Александр Савельевич Заяханов (lrf@pres.bsnet.ru, lmza@mail.ru); Галина Санжиевна Жамсуева; Сергей Анатольевич Нагуслаев; Вадим Владимирович Цыдыпов; Сергей Михайлович Сакерин (sms@iao.ru); Дмитрий Михайлович Кабанов (dkab@iao.ru); Михаил Анатольевич Тащилин (miketash@iszf.irk.ru).

нечный фотометр SP-7 [2], на ст. Торы – Sun-Sky-фотометр CE-318 (AERONET). Сопоставимость результатов измерений АОТ двумя типами фотометров подробно анализировалась в работе [4], где показано, что величина различия данных не превышает суммарной погрешности определения АОТ (для каждого прибора она оценивается как 0,01–0,02).

1. Характеристика измерений и региона исследований

Аппаратурно-методические вопросы определения АОТ атмосферы с помощью солнечного фотометра подробно рассматривались в [6]. Отметим, что измерения проводились в области спектра 0,35–1,06 мкм на 10 длинах волн, погрешность определения АОТ не превышала 0,01. При анализе данных за основу были взяты среднечасовые и среднедневные значения следующих характеристик: τ_{λ}^A – АОТ атмосферы на длине волны λ ; α – параметр формулы Ангрстрема $\tau_{\lambda}^A = \beta\lambda^{-\alpha}$; W – общее влагосодержание (содержание водяного пара в столбе атмосферы).

Облачность, как известно [7], может оказать существенное влияние на измерения прозрачности атмосферы. Поэтому проводилась фильтрация результатов измерений от облачных искажений – исключались данные, характеризующиеся резким одинаковым увеличением значений τ_{λ}^A на всех длинах волн, а также данные, полученные в разрывах облаков и в ситуациях, похожих на облачную пелену. Сроки измерений и объем экспериментальных данных представлены в табл. 1, а на рис. 1 отмечены пункты наблюдения прозрачности атмосферы. При анализе результатов привлекалась информация о метеорологических характеристиках атмосферы, полученных с помощью акустического метеоконцентра АМК-03 [8].

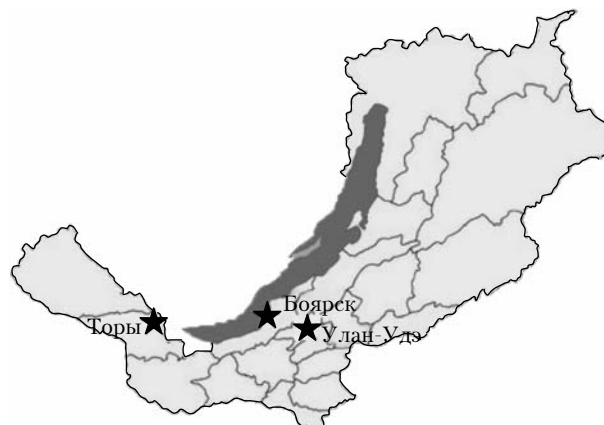


Рис. 1. Расположение станций мониторинга АОТ атмосферы в Байкальском регионе

г. Улан-Удэ и ст. Торы. Ежегодные экспедиционные исследования на юго-восточном побережье оз. Байкал (ст. Боярск) проводились в летние месяцы (2006–2009 гг.), где также был охвачен широкий спектр ситуаций с различными атмосферными условиями.

Приведем краткую климато-географическую характеристику пунктов наблюдений.

Город Улан-Удэ расположен в умеренной климатической зоне, в удалении от океанов и морей, в глубине Азиатского материка и значительно поднят над уровнем моря (~500 м), что и определяет основные черты его климата. Здесь преобладают континентальные воздушные полярные массы с преимущественно летом конвективных типов погоды, зимой – радиационного выхолаживания в антициклонах [9]. Характерной особенностью климата является господство зимой сибирского антициклона, который формирует холодную (до минус 40 °С), сухую и малооблачную погоду. Сменяется она прохладной, часто поздней сухой и ветреной весной. Лето короткое, жаркое (до +40 °С) и засушливое.

В первую половину лета (май–июнь) преобладают слабо выраженные антициклоны в массах теплого континентального воздуха умеренных широт. В это время происходит формирование теплой малооблачной почти без осадков погоды. Во вторую половину лета (июль–август) резко усиливается циклоническая деятельность, которая приводит к формированию теплых, пасмурных, дождливых погод. Продолжительная осень с ясными теплыми днями. Во все сезоны преобладают ветры западного (22%), северо-западного (24%) направлений. Слабое развитие адвективных процессов в нижнем слое атмосферы приводит к тому, что уже с осени в отрицательных формах рельефа скапливаются и застаиваются выхолаженные воздушные массы, что приводит к возникновению инверсий температуры.

В среднем за год в г. Улан-Удэ преобладает антициклонический тип погоды, что обуславливает повышение роли радиационных факторов в формировании климата исследуемого региона.

Ст. Боярск расположена на юго-восточном побережье оз. Байкал. Вблизи Байкала происходит резкое ослабление континентальности. Положение

Таблица 1

Сроки измерений АОТ атмосферы и объем экспериментального материала

Год	Станция	Период измерений	Количество дней измерений (единичных замеров)
2005	г. Улан-Удэ	28.10–05.11	8 (2108)
	ст. Боярск	11–21.08	10 (4545)
	ст. Моңды	01–02.10	2 (965)
	ст. Торы	09.06–23.11	34 (377)
2006	г. Улан-Удэ	09.02–21.06	77 (18072)
	ст. Боярск	09–11.08	3 (1495)
2007	ст. Торы	14.03–18.11	83 (1588)
	г. Улан-Удэ	01.02–02.06	69 (26422)
	ст. Боярск	24.08–03.09	8 (6584)
2008	ст. Торы	10.04–23.09	58 (1405)
	г. Улан-Удэ	29.05–31.12	161 (87527)
	ст. Боярск	07–13.07	6 (3146)
2009	ст. Торы	07.05–28.12	73 (1554)
	г. Улан-Удэ	02.01–04.06	121 (81440)
	ст. Боярск	17.06–16.07	22 (19729)
	ст. Торы	10.01–25.09	97 (1666)

Как видно из табл. 1, наиболее полный материал, включающий все сезоны года, имеется для

Байкала внутри области, отличающейся резкой континентальностью климата, создает большие контрасты температур между озером и прилегающей территорией, которые усиливаются еще за счет закрытого положения озера, окруженного со всех сторон горными хребтами, затрудняющими свободный обмен воздуха. Ст. Боярск нельзя в полной мере называть фоновой для региона, так как ее территория подвержена косвенному воздействию ряда близлежащих промышленных центров (г. Бабушкин, пос. Каменск, пос. Селенгинск и др.). Температурный градиент между озерной впадиной и сопредельными сухими котловинами, достигающий 20 °С и более, является одним из основных факторов образования и развития внутрикотловинной циркуляции и ее распространения по акватории озера, что часто способствует накоплению атмосферных примесей. Но все же его положение в лесной зоне и достаточно большое удаление от источников промышленных выбросов позволяют рассматривать станцию как место, слабо подверженное антропогенному воздействию.

Станция Торы (геофизическая обсерватория ИСЗФ СО РАН) расположена в Тункинской долине, в 50 км западнее оз. Байкал. Высота над уровнем моря ~670 м. Климат долины резко континентальный, в холодную часть года господствует азиатский антициклон. Зимой преобладают ясные дни с морозами до минус 50 °С. Для весны характерна ненастная погода с частыми небольшими снегопадами. Лето в первой половине жаркое (температура до 40 °С), во второй половине часто бывают дожди. Осень продолжительная, с ясными теплыми днями. По количеству солнечных дней в году Тункинская долина превосходит южный берег Крыма.

2. Результаты исследований АОТ атмосферы

На рис. 2 представлены среднегодовые спектральные зависимости τ_{λ}^A , усредненные по многолетним измерениям АОТ атмосферы в г. Улан-Удэ (2005–2009 гг.), на ст. Торы (2003–2008 гг.).

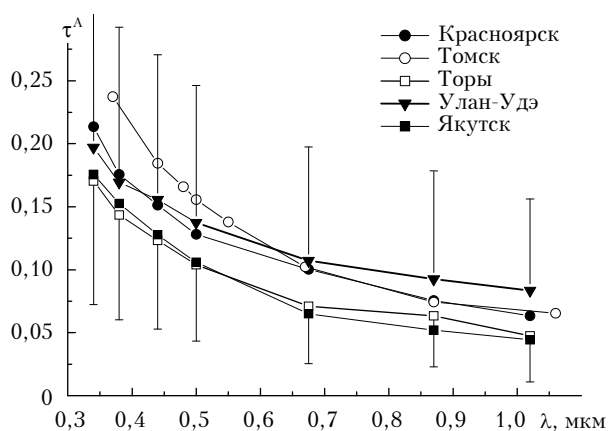


Рис. 2. Средние спектральные зависимости $\tau^A(\lambda)$ в различных районах Сибири: ст. Торы (2003–2008 гг.); Красноярск (2001–2004 гг.); Якутск (2004–2008 гг.); Улан-Удэ (2005–2009 гг.); Томск (2003–2008 гг.)

Для сравнения приведены среднегодовые спектральные зависимости τ_{λ}^A , полученные в других районах Сибири по данным AERONET наблюдений. Данные для Томска взяты из работы [10]. Как видно из рис. 2, среднегодовые значения τ_{λ}^A в районе ст. Торы, как и в Якутске, имеют минимальные значения, а в Улан-Удэ занимают промежуточное положение между Томском и Красноярском.

Как известно, межгодовые колебания τ_{λ}^A вызваны, в основном, влиянием естественных факторов (вулканические извержения, дымная мгла от лесных пожаров, синоптические особенности года) [11, 12]. Изменение средних годовых значений $\tau_{0,55}^A$ в г. Улан-Удэ за период с 2006 по 2009 г. показано на рис. 3.

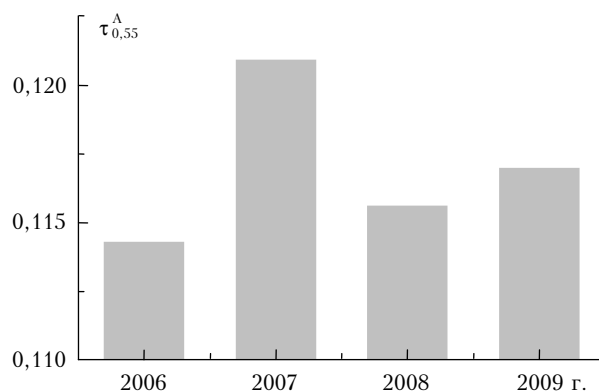


Рис. 3. Изменения средних годовых значений $\tau_{0,55}^A$ в Улан-Удэ

Следует отметить, что сюда не вошли результаты измерений 2005 г. из-за малого периода наблюдений. Из рис. 3 видно, что межгодовые колебания аэрозольного замутнения атмосферы в г. Улан-Удэ составляют малую величину (не более 6%).

Сезонные вариации АОТ атмосферы обусловлены внутригодовой изменчивостью радиационного режима, состоянием подстилающей поверхности и пр. Наиболее общей закономерностью, свойственной для территории Сибири, являются увеличение АОТ в весенне-летний период и снижение в осенние и зимние месяцы [12]. В табл. 2 представлены средние значения τ_{λ}^A , α и W в зависимости от сезонов года.

Выделение сезонов года по срокам выполнено с учетом особенностей регионального климата в районе наблюдения [11]. Для атмосферы г. Улан-Удэ характерно существование весеннего максимума АОТ и летнего максимума влагосодержания атмосферы. Минимальные значения АОТ наблюдаются в летние и осенние месяцы.

Для оценки сезонных вариаций аэрозольных характеристик на рис. 4 представлены средние спектральные значения τ_{λ}^A для г. Улан-Удэ и Томска. Из данных, приведенных на рис. 2 и 4, видно, что по сравнению со среднегодовыми значениями сезонные отличия спектральных зависимостей $\tau^A(\lambda)$ более существенны.

Для района Томска характерны, в целом, более высокие замутнения атмосферы и большая селективность спектрального хода АОТ в весенний период

Таблица 2

Средние сезонные значения и средноквадратические отклонения (СКО) параметров τ_λ^A , α и W в г. Улан-Удэ за весь период наблюдений (2006–2009 гг.)

$\tau(\lambda)$, мкм	Зима		Весна		Лето		Осень	
	Среднее	СКО	Среднее	СКО	Среднее	СКО	Среднее	СКО
$\tau(0,339)$	0,2148	0,0668	0,2340	0,0913	0,1791	0,0874	0,1667	0,0502
$\tau(0,367)$	0,1978	0,0604	0,2132	0,0846	0,1579	0,0768	0,1476	0,0443
$\tau(0,409)$	0,1819	0,0532	0,1931	0,0730	0,1478	0,0679	0,1351	0,0593
$\tau(0,440)$	0,1708	0,0479	0,1843	0,0693	0,1404	0,0649	0,1232	0,0401
$\tau(0,500)$	0,1438	0,0426	0,1579	0,0630	0,1266	0,0508	0,1075	0,0286
$\tau(0,550)$	0,1239	0,0385	0,1422	0,0535	0,1081	0,0547	0,0954	0,0284
$\tau(0,676)$	0,1104	0,0335	0,1207	0,0397	0,0893	0,0504	0,0839	0,0385
$\tau(0,868)$	0,095	0,0309	0,1053	0,0329	0,0723	0,0409	0,0710	0,0252
$\tau(1,045)$	0,0861	0,0307	0,0922	0,0320	0,0579	0,0371	0,0561	0,0228
α	0,835723		0,829028		0,979008		0,917089	
W , г/см ²	0,13		0,68		0,82		0,34	

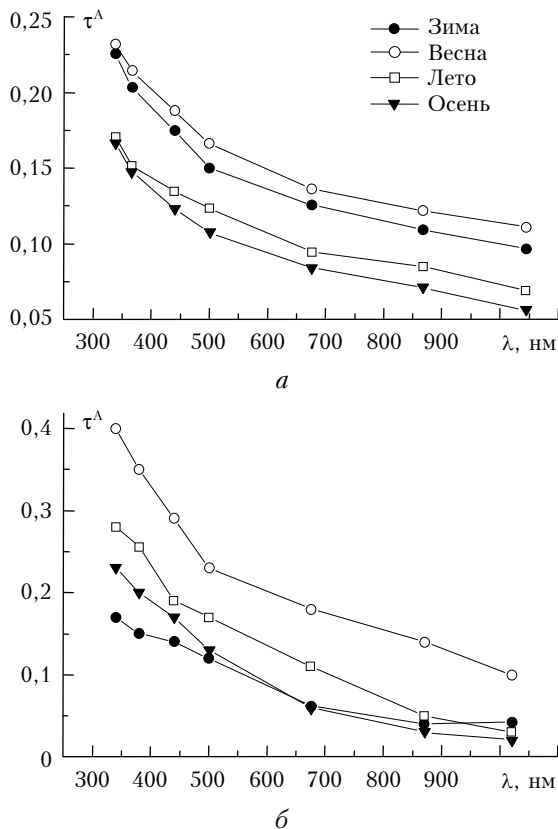


Рис. 4. Средние сезонные спектральные зависимости АОТ для Улан-Удэ и Томска: а – Улан-Удэ (2006–2009 гг.); б – Томск (2002–2004 гг.)

по отношению к другим сезонам. Кроме того, минимальные аэрозольные замутнения в Томске и Улан-Удэ наблюдаются в разные сезоны: в Томске – это зимний период, в Улан-Удэ – летние и осенние месяцы. Относительно высокие зимние значения АОТ в г. Улан-Удэ, по-видимому, связаны с преобладающим влиянием в этот период года сибирского антициклона, формирующего инверсии температуры, которые усиливаются еще и за счет орографических особенностей рельефа, способствующих накоплению атмосферных примесей.

Спектральные зависимости $\tau^A(\lambda)$ в рассматриваемых районах (см. рис. 2 и 4) качественно одинаковы и характеризуются степенным спадом АОТ с ростом длины волны (формула Ангстрема). Отличительной особенностью данных в Улан-Удэ является меньшая селективность спектрального хода $\tau^A(\lambda)$. Например, средняя летняя величина показателя селективности α в Томске составляет $\sim 1,4$ [10], а в Улан-Удэ 0,98. Низкие значения показателя α свидетельствуют об относительно малом содержании в атмосфере мелкодисперсного аэрозоля.

Сопоставление результатов экспедиционных исследований выявило и внутрирегиональные особенности характеристик АОТ на станциях, в разной степени подверженных влиянию антропогенных источников в регионе. На рис. 5 для сравнения приведены средние спектральные зависимости АОТ в исследуемых районах (г. Улан-Удэ, ст. Боярск, ст. Торы, ст. Монды) в летний период.

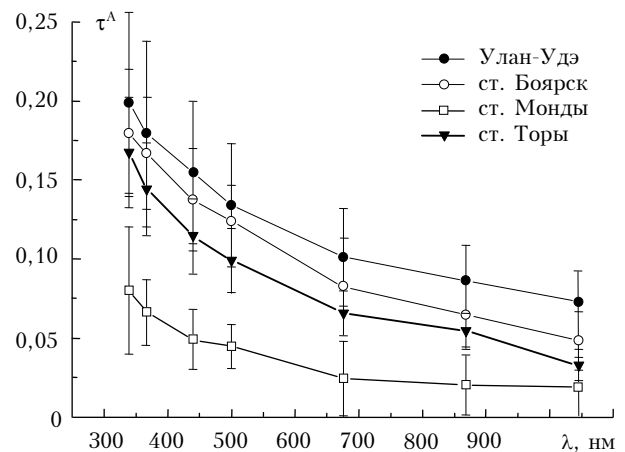


Рис. 5. Средние спектральные зависимости АОТ на станциях Байкальского региона за летние месяцы (2005–2009 гг.)

Вследствие более высокого антропогенного воздействия на атмосферу максимальные значения АОТ наблюдались в г. Улан-Удэ ($\tau_{0,5} = 0,13$), что в среднем на 26% превышает значения, полученные для этого же периода на ст. Торы ($\tau_{0,5} = 0,1$). Средние

значения АОТ на юго-восточном побережье оз. Байкал (ст. Боярск) тоже имеют низкие значения ($\tau_{0,5} = 0,11$), что свидетельствует о малом влиянии промышленных выбросов. Для сравнения на рис. 5 приведены данные, полученные в период калибровки фотометра на высокогорной фоновой станции Монды. Как и следовало ожидать, замутнение атмосферы в этом районе минимальное.

Заклучение

Исследования прозрачности атмосферы Байкальского региона показали достаточно низкие уровни аэрозольного замутнения атмосферы и малую межгодовую изменчивость. Спектральная зависимость $\tau^A(\lambda)$ является типичной для сибирских станций, но отличается меньшей селективностью.

Выявлены пространственные неоднородности прозрачности атмосферы внутри региона, обусловленные разной удаленностью от промышленных предприятий и особенностями подстилающей поверхности. Более высокие аэрозольные замутнения, из-за антропогенного воздействия, наблюдаются в г. Улан-Удэ ($\tau_{0,5} = 0,13$). АОТ атмосферы в районе Боярска и Торы в среднем на 20–26% ниже.

В сезонной изменчивости АОТ в г. Улан-Удэ и на ст. Торы проявляется весенний максимум замутнения, а минимальные значения АОТ наблюдаются в летние и осенние месяцы. В зимний период в г. Улан-Удэ отмечается повышенная мутность атмосферы, обусловленная инверсионным накоплением аэрозоля.

Работа выполнена при финансовой поддержке Интеграционного проекта СО РАН № 75.

1. Сакерин С.М., Кабанов Д.М., Панченко М.В., Полькин В.В., Холбен Б.Н., Смирнов А.В., Береснев С.А., Горда С.Ю., Корниенко Г.И., Николашкин С.В., Поддубный В.А., Тацилин М.А. Результаты мониторинга

атмосферного аэрозоля в азиатской части России по программе AEROSIBNET в 2004 г. // Оптика атмосф. и океана. 2005. Т. 18. № 11. С. 968–975.

2. Кабанов Д.М., Сакерин С.М., Ростов А.П., Турчинович С.А., Турчинович Ю.С. Система сетевого мониторинга радиационно-активных компонентов атмосферы. Часть I. Солнечные фотометры // Оптика атмосф. и океана. 2004. Т. 14. № 17. С. 355–360.
3. Бартенева О.Д., Никитинская Н.И., Сакунов Г.Г., Веселова Л.К. Прозрачность толщи атмосферы в видимой и ближней ИК-области спектра. Л.: Гидрометеоиздат, 1991. 224 с.
4. Буфал В.В. Некоторые данные о прозрачности атмосферы на Байкале // Элементы гидрометеорологического режима озера Байкал. М.; Л.: Наука, 1964. С. 170–178.
5. Буфал В.В. Радиационный режим котловины оз. Байкал и его роль в формировании климата // Климат озера Байкал и Прибайкалья. М.: Наука, 1966. С. 34–70.
6. Кабанов Д.М., Сакерин С.М., Турчинович С.А. Солнечный фотометр для научного мониторинга (аппаратура, методики, алгоритмы) // Оптика атмосф. и океана. 2001. Т. 14. № 12. С. 1162–1169.
7. Матющенко Ю.Я., Ошлаков В.К., Павлов В.Е. О селекции данных AERONET. Часть I: обоснования методик // Оптика атмосф. и океана. 2006. Т. 19. № 4. С. 271–277.
8. Азбукин А.А., Богушевич А.Я., Ильичевский В.С., Корольков В.А., Тихомиров А.А., Шелевой В.Д. Автоматизированный ультразвуковой метеорологический комплекс АМК-03 // Метеорол. и гидрол. 2006. № 11. С. 89–97.
9. Климат Улан-Удэ. Л.: Гидрометеоиздат, 1983. 239 с.
10. Сакерин С.М., Кабанов Д.М. Спектральная зависимость аэрозольной оптической толщи атмосферы в области спектра 0,37–4 мкм // Оптика атмосф. и океана. 2007. Т. 20. № 2. С. 156–164.
11. Горбаренко Е.В. Аэрозольная составляющая оптической толщины атмосферы как характеристика антропогенного загрязнения над промышленными центрами // Метеорол. и гидрол. 1997. № 3. С. 12–18.
12. Абакумова Г.М., Горбаренко Е.В. Прозрачность атмосферы в Москве за последние 50 лет и ее изменения на территории России. М.: Изд-во ЛКИ, 2008. 192 с.

A.S. Zayakhanov, G.S. Zhamsueva, S.A. Naguslaev, V.V. Tsydyrov, S.M. Sakerin, D.M. Kabanov, M.A. Tashchilin. The results of investigation of the aerosol optical thickness of the atmosphere in the Baikal region.

The results of the analysis of variations of aerosol optical thickness of atmosphere in Ulan-Ude during four year (2006–2009) observations by means of sun photometer SP-7 are presented. Seasonal features of spectral dependences of aerosol optical thickness and the total humidity of atmosphere are discussed. The high aerosol turbidity of atmosphere for Ulan-Ude in winter in distinction from most stations of Siberia is observed. Comparisons of average spectral dependences of aerosol optical thickness and the total humidity of atmosphere in Ulan-Ude with measurements on Lake Baikal coast (station Boyarsk) and other stations of the Asian part of Russia are made.