

УДК 551.521.3:551.510.42

ВАРИАЦИИ АЭРОЗОЛЯ В ТОЛЩЕ АТМОСФЕРЫ ПО ДАННЫМ РОССИЙСКОЙ АКТИНОМЕТРИЧЕСКОЙ СЕТИ (1976–2006 гг.)

© 2009 г. И. Н. Плахина*, Н. В. Панкратова*, Е. Л. Махоткина**

*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН

119017 Москва, Пыжевский пер., 3

E-mail: inna@ifaran.ru

E-mail: n_pankratova@list.ru

**Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова

194021 Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 7

E-mail: makhotk@main.mgo.rssi.ru

Поступила в редакцию 15.01.2008 г., после доработки 13.11.2008 г.

Обобщены результаты анализа вариаций оптической толщины вертикального столба атмосферы по тридцатилетним (1976–2006 гг.) рядам наблюдений российской актинометрической сети. Исследование выполнено на основе специализированной базы данных “Прозрачность атмосферы”, созданной в ГГО им. А.И. Воейкова на основе наблюдений, проводимых на актинометрических станциях Росгидромета. Выявлены общие закономерности пространственных изменений АОТ по территории России – монотонное убывание с юго-запада на северо-восток с очагами локализации районов с различной аэрозольной нагрузкой, обусловленные глобальными и региональными факторами ее формирования. Исследована пространственно-временная структура аномалий годовых значений АОТ в рассматриваемом временном интервале, включающем два крупных вулканических извержения: Эль-Чичон (1982 г.) и Пинатубо (1991 г.).

В настоящее время доказана связь между ростом глобальной приземной температуры атмосферы и ростом содержания в атмосфере “парниковых” газов. Основная часть потепления в последние 50 лет связана с деятельностью человека [1, 2]. Наряду с антропогенным фактором на климат воздействуют и естественные причины, проявляющиеся на временных интервалах от нескольких лет до нескольких десятков лет: вариации солнечной постоянной, циклические взаимодействия между атмосферой и океаном и атмосферный аэрозоль. Знак аэрозольного воздействия может быть разным: стратосферный аэрозольный слой, вызывая отражение входящей на верхнюю границу атмосферы солнечной радиации, уменьшает нагрев нижележащих слоев, например, сульфатный вулканический аэрозоль, образовавшийся в стратосфере после извержения вулкана Пинатубо (июнь 1991 г.) вызвал “кратковременное”, в течение 1993 г., глобальное похолодание [3]. Тропосферный аэрозоль может как увеличивать, так и уменьшать приземную температуру воздуха, а его влияние на экологическое состояние воздуха хорошо известно [4]. Поэтому мониторинг аэрозольной составляющей атмосферы актуален и необходим как с точки зрения ее климатических воздействий, так и с экологической точки зрения, а изучение современных пространственно-временных вариаций аэрозольной компоненты в атмосфере представляет научный интерес и проблему, примерами такого интереса являются современные назем-

ные сети мониторинга, в частности, AERONET [5–7]. На территории России расположено 8 станций AERONET, семь из которых находятся в Сибирском регионе [8].

На картах, показывающих глобальное распределение интенсивности источников поступления в атмосферу аэрозолей разного вида (антропогенных и естественных, органических и минеральных, морских и вулканических) и суммарной оптической толщины аэрозоля в толще атмосферы по данным моделирования [1] и аэрозольной оптической толщины по данным спутникового (программа MODIS) мониторинга [2], российский регион представлен как территория убывания аэрозольной оптической толщины (АОТ) в направлении с юга на север. В то же время, Россия занимает всю северо-восточную часть Евразии (30° E–180° E; 50° N–80° N) и включает в себя различные климатические зоны, отличающиеся влажностью, температурой, облачностью и потоком солнечной радиации, входящей к земной поверхности, а также характером подстилающей поверхности, типом циркуляции воздушных масс. При этом плотность населения и степень индустриализации различных районов России весьма неоднородна по пространству.

Авторами настоящей статьи были опубликованы работы [9, 10], в которых показано, что анализ аэрозольной оптической толщины вертикального столба атмосферного воздуха может быть выполнен с использованием данных наблюдений россий-

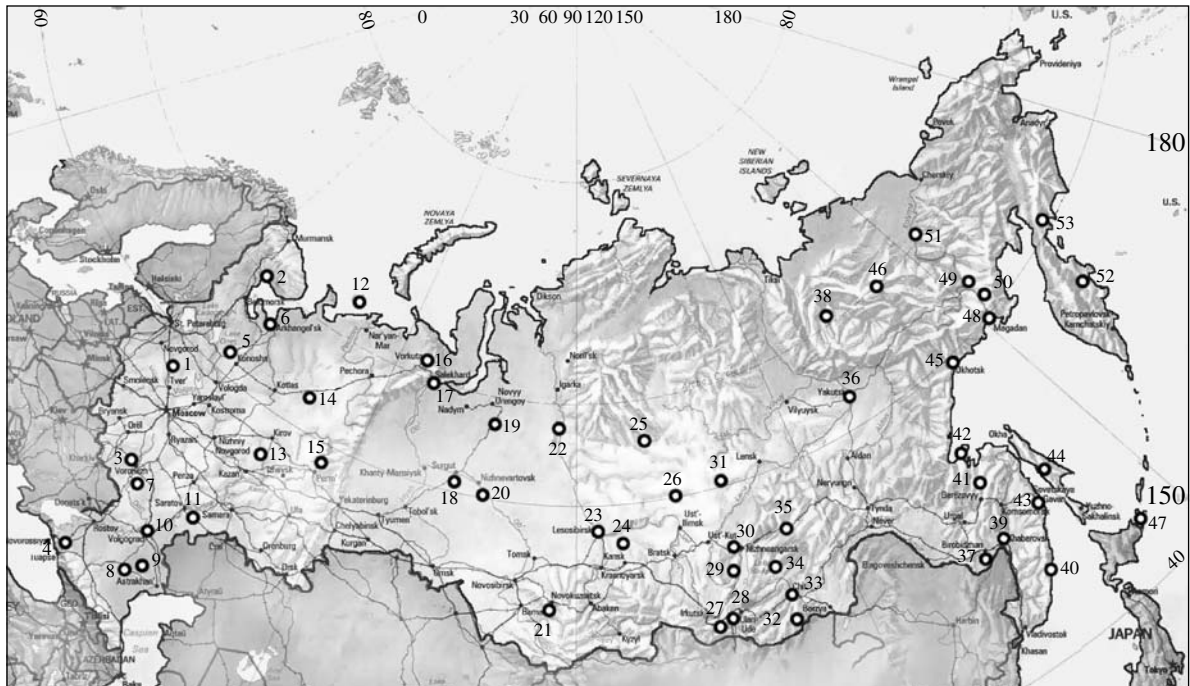


Рис. 1. Схема расположения 53 актинометрических станций (табл. 1), данные которых анализировались в настоящей работе.

ской актинометрической сети, в частности, по измерениям интегральной прозрачности атмосферы (P), поскольку вариации P в большой степени определяются аэрозольной компонентой ослабления прямой солнечной радиации; другие составляющие ослабления (водяной пар, прочие газы) мало влияют на ее временные изменения. Таким образом, на основании данных однородных (откалиброванных по единому эталону и полученных по единой методике) рядов наблюдений потоков прямой солнечной радиации у поверхности Земли и оценок интегральной (суммарной и аэрозольной) прозрачности можно провести анализ вариаций аэрозольной оптической толщины (АОТ) вертикальной атмосферы, что и было сделано нами в [9, 10] по наблюдениям 44 станций актинометрической сети за 1976–2003 годы. Был изучен характер многолетнего сезонного хода АОТ, оценены простейшие статистические параметры (средние, экстремумы, коэффициенты вариаций) пространственных изменений среднегодовых АОТ, а также количественно оценено “очищение” атмосферы от аэрозоля в последнее десятилетие периода наблюдений.

В настоящей работе продолжается анализ на основе расширенной базы данных (число рассмотренных станций увеличено на 9, период рассмотрения продлен до 2006 г.), обобщаются результаты, полученные ранее, сравнивается степень воздействия на аэрозольную оптическую толщину (АОТ) двух естественных факторов: глобального фактора – мощных вулканических извержений 2-й половины XX века, в результате которых возник стратосфер-

ный аэрозольный слой, и регионального (тропосферного) фактора, например, поступления аэрозоля в атмосферу в результате тундровых и лесных пожаров.

На рис. 1 представлена карта России, на которой указано расположение 53-х станций (табл. 1) актинометрической сети России [11, 12], для которых по измеренным значениям потока прямой солнечной радиации у поверхности Земли выполнялись оценки аэрозольной оптической толщины вертикального столба атмосферы (АОТ) для длины волны 0.55 мкм. Рассматриваемые станции охватывают большую часть российского региона и расположены вне зон непосредственных локальных антропогенных источников промышленных и городских выбросов атмосферного аэрозоля (пригороды, сельские местности, возвышенности и пр.). Иначе говоря, рассматриваемые пространственно-временные изменения АОТ формируются под воздействием естественных причин: адвекции воздушных масс из областей повышенной или пониженной аэрозольной нагрузки, вулканическими извержениями, лесными и тундровыми пожарами. При анализе наблюдений с 1976 по 2006 гг. нашей целью было получить осредненную картину пространственного распределения атмосферного аэрозоля над территорией России и сопоставить ее с картиной глобального распределения аэрозоля, представленной в третьем (моделирование) и четвертом (спутниковые данные, MODIS) докладах IPCC [1, 2]. В этом случае оценки по нашей методике дополняют международные данные модельных представлений и спутнико-

Таблица 1. Актинометрические станции, данные наблюдений которых использованы в работе

Широта	Долгота	НАЗВАНИЕ, номер станции, высота над ур. моря (м)	Широта	Долгота	НАЗВАНИЕ, высота над ур. моря (м)
58.0	33.3	Валдай, 1, 200	51.7	105.9	Бабушкин, 27, 465
66.7	34.3	Умба, 2, 39	51.8	107.3	Иволгинск, 28, 562
51.6	38.4	Нижедевицк, 3, 186	53.2	107.3	Хужир, 29, 487
45.1	39.0	Краснодар, 4, 28	56.3	107.7	Казачинское, 30, 355
61.5	39.0	Каргополь, 5, 124	61.3	107.9	Ербогачен, 31, 284
64.6	40.5	Архангельск, 6, 8	49.7	112.7	Мангут, 32, 807
51.1	40.7	Каменная степь, 7, 193	52.1	113.5	Чита, 33, 671
46.5	41.3	Гигант, 8, 79	54.5	113.6	Богдарин, 34, 996
47.7	42.1	Цимлянск, 9, 64	57.8	114.0	Мамакан, 35, 244
48.7	44.4	Волгоград, 10, 118	62.0	129.7	Якутск, 36, 98
51.4	48.3	Ершов, 11, 110	47.7	131.0	Екатерино-Никольское, 37, 72
68.8	49.3	Бугрино, 12, 11	67.6	133.4	Верхоянск, 38, 137
57.6	49.9	Нолинск, 13, 147	48.5	135.1	Хабаровск, 39, 88
62.2	50.4	Усть-Вымь, 14, 106	44.4	135.9	Рудная Пристань, 40, 26
58.8	56.2	Чермоз, 15, 122	52.4	136.5	Полины Осипенко, 41, 73
67.1	64.1	Елецкая, 16, 113	54.8	137.5	Большой Шантар, 42, 8
66.5	66.6	Салехард, 17, 14	49.0	140.3	Сов. Гавань, 43, 21
61.3	71.2	Сытомино, 18, 32	50.7	142.7	Тымовское, 44, 94
64.9	77.8	Тарко-Сале, 19, 26	59.4	143.2	Охотск, 45, 5
60.4	77.9	Александровское, 20, 47	66.5	143.2	Усть Мома, 46, 196
53.3	87.2	Кузедеево, 21, 293	44.0	145.8	Южно-Курильск, 47, 49
65.8	87.9	Туруханск, 22, 38	59.5	150.7	Магадан, 48, 115
58.4	92.2	Енисейск, 23, 77	62.4	152.3	Среднекан, 49, 264
56.2	95.3	Солянка, 24, 359	61.1	152.4	Талая, 50, 703
64.3	100.3	Тура, 25, 188	67.5	153.7	Среднеколымск, 51, 21
60.3	102.3	Ванавара, 26, 259	56.3	160.8	Ключи, 52, 28
			60.4	166.0	Корф, 53, 2

вого мониторинга АОТ. Достоинством наших оценок является большая длина рассматриваемого ряда актинометрических наблюдений (31 год), универсальность методики измерений и обработки результатов для всех станций, а также обширная площадь охвата мало рассматриваемой, но большой по площади территории России. Наше исследование находится также в русле работ российских ученых [13–21] по исследованию региональной многолетней изменчивости аэрозольной компоненты ослабления потока прямой солнечной радиации, приходящей к поверхности Земли, в качестве экологического и климатического фактора.

ЭМПИРИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ И МЕТОДИКА АНАЛИЗА

Формируемая в ГГО специализированная база данных “Прозрачность атмосферы” позволяет ана-

лизировать интегральную и аэрозольную прозрачность атмосферы [11–12]. Отбор станций, представленных на карте (рис. 1), проведен с учетом качества и полноты инструментальных рядов. Расчет аэрозольной оптической толщины вертикальной атмосферы проводился по специальной методике, разработанной и примененной в Метеорологической обсерватории МГУ [13–15], при учете ограничений и погрешностей метода:

$$\frac{\ln S - [0.1886w^{-0.1830} + (0.8799w^{-0.0094} - 1)/\sin h]}{0.8129w^{-0.0021} - 1 + (0.4347w^{-0.0321} - 1)/\sin h} = \text{АОТ.} \tag{1}$$

АОТ – аэрозольная оптическая толщина атмосферы, показатель спектрального ослабления Ангрстрема, зависящий от распределения частиц по размерам и коэффициента преломления частиц, предполагается равным 1; S – прямая солнечная

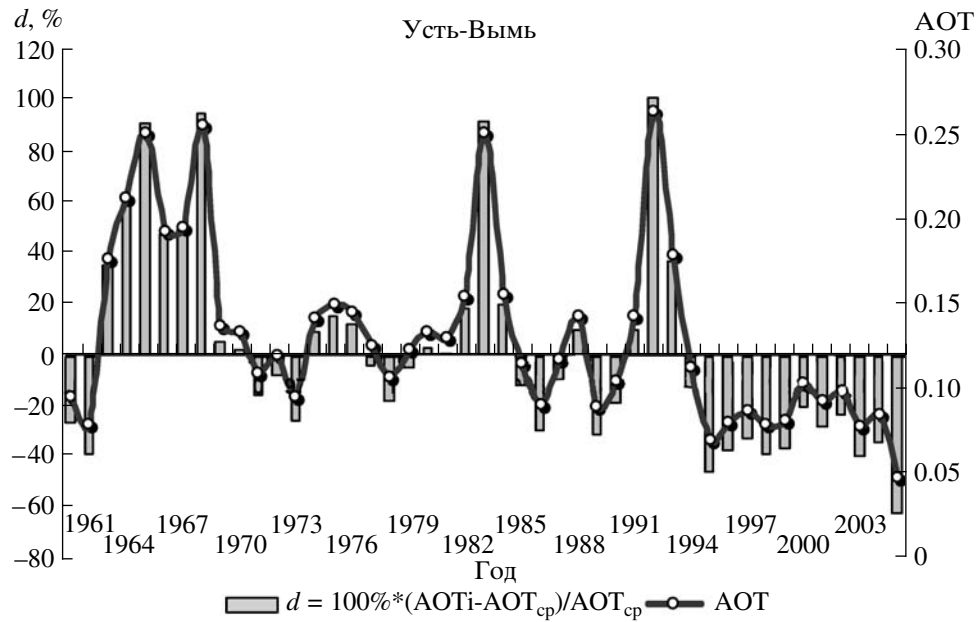


Рис. 2. Пример многолетних изменений среднегодовых значений аэрозольной оптической толщины (АОТ) и их отклонений от среднего d (%).

радиация, приведенная к среднему расстоянию между Землей и Солнцем, Вт/м²; w – влагосодержание атмосферы, г/см². Условия наблюдений на станциях – это, как правило, погода антициклонального типа при Солнце, свободном от облаков (безоблачная или малооблачная).

На рис. 2 представлен “длинный” (45 лет) ряд среднегодовых значений АОТ для станции Усть-Вымь (62.2° N, 50.4° E), демонстрирующий типичную многолетнюю тенденцию изменения годовых АОТ и ее отклики на стратосферные возмущения. Проявления четырех мощных вулканических эпизодов: Агунг (8° S, 116° E 1963), Фуэго (14° N, 91° W, 1974), Эль Чичон (17° N, 93° W, 1982), Пинатубо (15° N, 120° W, 1991) четко выражены и количе-

ственно оцениваются. В частности, максимальный эффект, наблюдающийся через год после извержения, составляет 100% (в отклонениях от многолетней нормы), далее в течение года происходит его ослабление по мере диссипации и трансформации стратосферного аэрозольного слоя. Ярко выражено также уменьшение величины АОТ для периода с 1995 по 2006 гг. Такой характер многолетних изменений годовых АОТ свойствен большинству станций и в значительной мере определяется четырьмя мощными вулканическими извержениями второй половины XX века, поскольку при годовом осреднении сезонные и локальные возмущения, связанные с воздействиями тропосферного аэрозоля, нивелиру-

Таблица 2. Многолетние средние, максимальные и минимальные значения и стандартные отклонения среднегодовых АОТ по всем станциям в абсолютных единицах

Период	АОТ		σ	Тенденция изменения АОТ в % за 10 лет
1976–2006 гг.	Среднее значение	0.14	0.04	–13
	Максимальное значение	0.30		+21
	Минимальное значение	0.07		–38
1995–2006 гг.	Среднее АОТ (σ)	0.12	0.04	
	Максимальное значение	0.22		
	Минимальное значение	0.06		

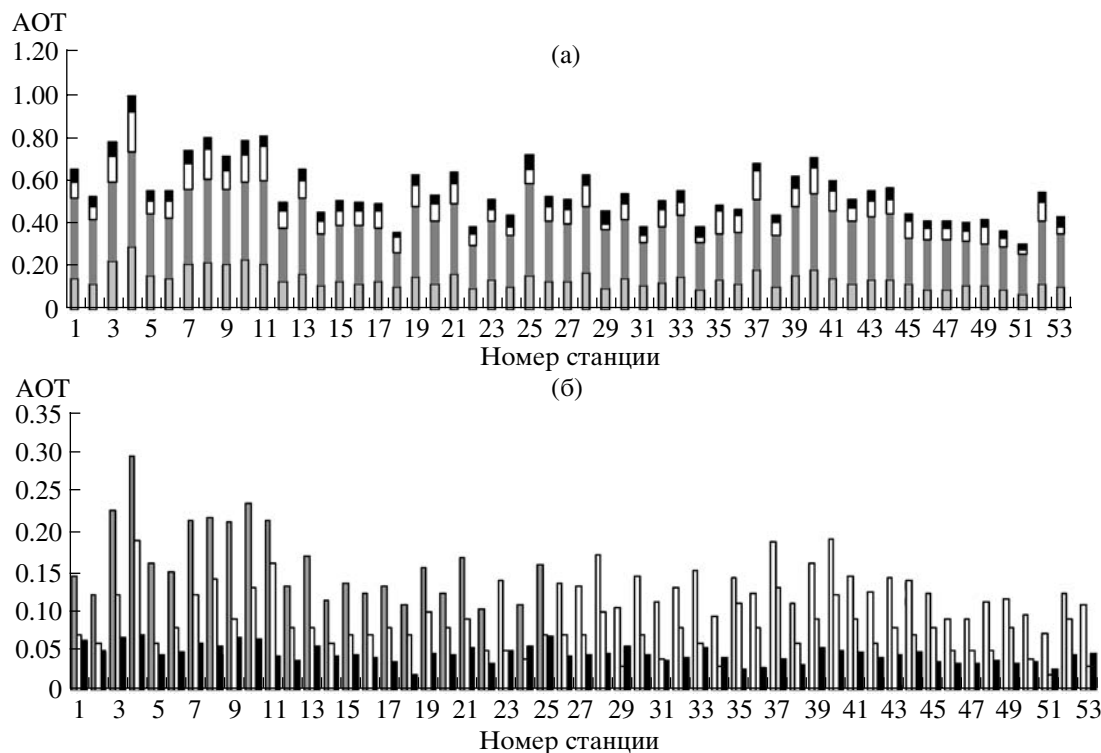


Рис. 3. Статистика среднегодовых величин АОТ для каждой станции: а – соотношение средних (светло-серый цвет) за период 1976–2006 гг., максимальных (темно-серый цвет) и минимальных (белый цвет) значений, а также стандартных отклонений (черный цвет) в рядах годовых АОТ для каждой станции; б – соотношение средних (серый цвет) за период 1976–2006 гг. и средних (белый цвет) за период 1995–2006 гг., а также стандартных отклонений (черный цвет) в рядах годовых АОТ для каждой станции.

ются и практически не влияют на распределение многолетних значений АОТ.

ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ВАРИАЦИИ АОТ

Средние многолетние и экстремальные значения годовых АОТ, стандартные отклонения от этих средних, осредненные по всем рассматриваемым станциям для двух периодов, представлены в табл. 2. Как видно, среднее значение АОТ по всем станциям и по всему периоду наблюдений равно 0.14 и варьирует от 0.30 до 0.07, что хорошо согласуется с пространственным диапазоном вариаций АОТ, полученным по спутниковым данным и данным моделирования аэрозольных источников для российского региона, представленным в третьем и четвертом докладах IPCC (0.30–0.05).

Годовые величины АОТ для каждой станции (средние многолетние за 1976–2006 гг., их стандартные отклонения, максимальные и минимальные значения) представлены на рис. 3. Каждый столбик диаграммы соответствует номеру станции в табл. 1. Разным цветом обозначены средние значения характеристик АОТ для каждой станции: светло-серый цвет соответствует средним многолетним годовым значениям АОТ, темно-серый – максимальным годовым значениям АОТ, белый – минимальным,

черный – стандартным отклонениям годовых АОТ от среднего значения для каждой станции (рис. 3а); серый цвет на рис. 3б соответствует средним многолетним годовым значениям АОТ для периода 1976–2006 гг., белый – средним многолетним годовым значениям АОТ для периода 1994–2006 гг., черный – стандартным отклонениям годовых АОТ от среднего значения для каждой станции.

Более детальная картина пространственного распределения АОТ приведена на картах-схемах (рис. 4); построенных путем интерполяции данных 53-х станций на территорию России. Для интерполяции использованы технологии пакета программ MATLAB 7.3.0. (R2006b): опции создания равномерной сетки для всего региона, на которую проектировались данные функции $Z = F(x, y)$, где x и y – соответственно широта и долгота для каждой из 53 точек наблюдения, Z – среднее значение АОТ. При этом проводилась билинейная интерполяция данных. При бикубической и биквадратной интерполяции результаты принципиально не отличаются от приведенных на рис. 4.

Пространственное распределение средних АОТ за 31-летний период (рис. 4а), неплохо соответствует результатам моделирования пространственного распределения атмосферного аэрозоля, представ-

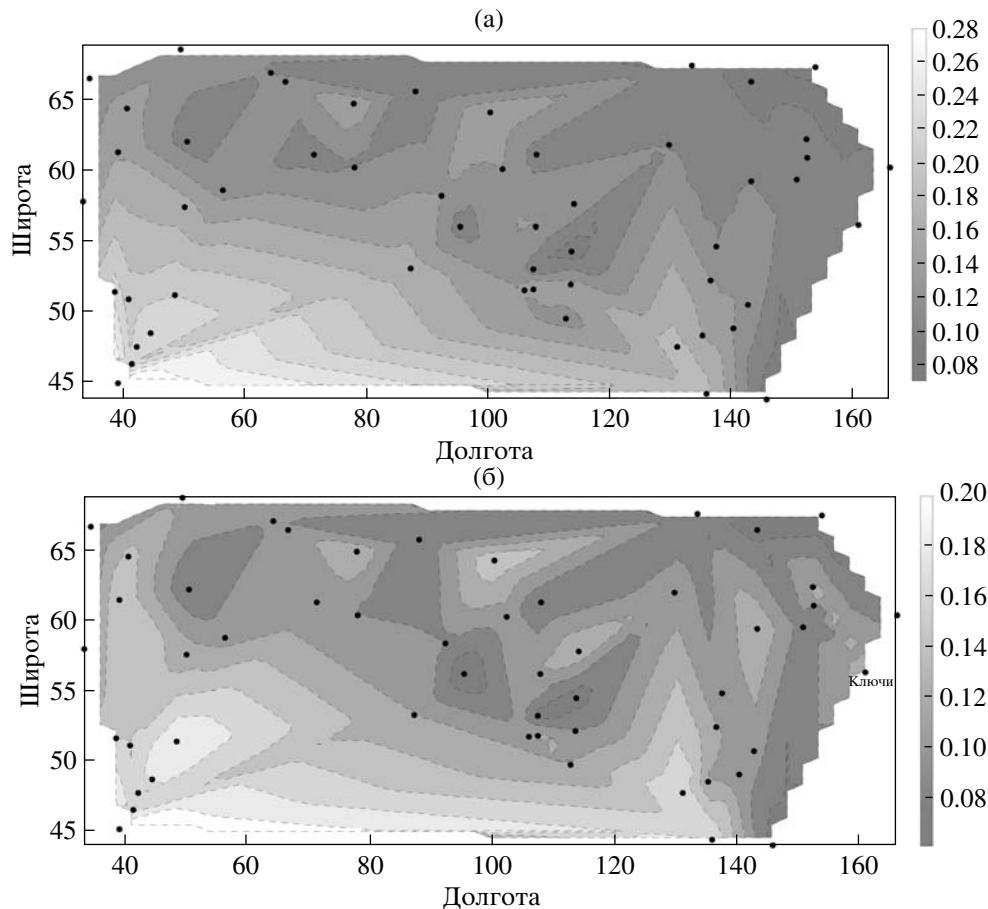


Рис. 4. Пространственные распределения средних многолетних значений АОТ: а – по периоду наблюдений 1976–2006 гг.; б – по периоду наблюдений 1995–2006 гг.

ленным в третьем докладе IPCC [2]. Модель, описанная в IPCC, учитывает аэрозоли различного происхождения (антропогенные и естественные сульфаты, органические частицы, сажа, минеральный аэрозоль естественного происхождения, морские солевые частицы), имеющие специфические особенности распределения по земному шару, и дает результат в виде убывания АОТ над Евразией от южных широт к северным при наличии очагов повышенной мутности в Южной Европе, Ближнем Востоке и Юго-Восточной Азии, Украине и Казахстане. Рисунок 4 показывает, что на территории России АОТ убывает с юго-запада на северо-восток. Повышенные значения аэрозольной замутненности на юго-востоке и юго-западе связаны скорее всего с адвективным поступлением воздушных масс из районов высокого содержания аэрозоля в атмосфере: на юго-западе – с Украины и Казахстана, на юго-востоке – из Юго-Восточной Азии и Китая). На рис. 4а видны области локализации региональных тропосферных источников аэрозоля (в Западной и Восточной Сибири, в Приморье). В последнее десятилетие (рис. 4б), в отсутствие крупных вулканических

извержений, в условиях очищения атмосферы от стратосферного аэрозольного слоя очаги поступления аэрозоля в тропосферу проявляются более отчетливо. Кроме того, в последнее десятилетие появляется заметное увеличение АОТ для нескольких станций Дальнего Востока, возможно, обусловленное усилением вулканической деятельности на Камчатке [22].

Пространственно-временные неоднородности годовых АОТ наглядно отражают их причины (рис. 5а): пики вулканических извержений (Эль-Чичон – 1982 г., Пинатубо – 1991 г.) и тундровые пожары последнего десятилетия в Восточной Сибири, частота и интенсивность которых возросла в связи климатическими изменениями [3]. Картина вариаций среднего годового хода АОТ приведена на рис. 5б. Особенности среднего годового хода АОТ для каждой конкретной станции формируются под воздействием сезонных изменений характера переноса воздушных масс в данную точку из областей с разным содержанием аэрозоля (синоптические процессы), сезонными изменениями температуры, влажности и состояния подстилающей поверхности в сочетании с

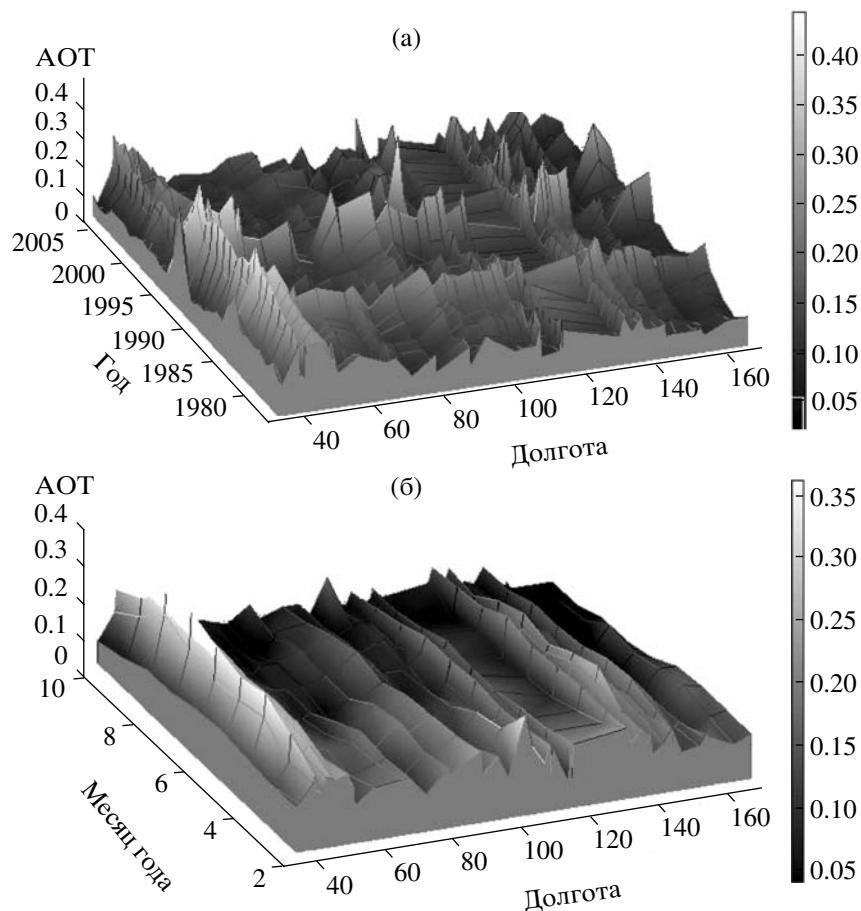


Рис. 5. Пространственно-временные изменения АОТ: а – многолетний ход годовых величин АОТ для всех рассматриваемых станций, б – средний сезонный ход АОТ всех рассматриваемых станций.

промышленной нагрузкой отдельных регионов. Как правило, наблюдаются максимумы АОТ в апреле и июле–августе, но летний максимум выражен более отчетливо на станциях, расположенных на юге ЕТР (№№ 4, 8, 9, 10, 11). Прежде всего, это связано с тем, что здесь летом преобладают тропические воздушные массы, для которых характерны высокие содержания влаги и аэрозоля. Весенний максимум обусловлен сходом снежного покрова и сменой доминирующих арктических воздушных масс на умеренные или тропические.

ВРЕМЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ

На рис. 6а приведены примеры временных изменений среднегодовых АОТ для станций с отрицательным и положительным трендом. На рис. 6б примеры временных трендов годовых АОТ дополнены соответствующими изменениями потока прямой солнечной радиации (для высоты Солнца $h = 30^\circ$), достигающими 100 Вт/м^2 за 31 год (3 Вт/м^2 в год), оценки выполнены для двух станций – с максимальным и минимальным значением среднего

значения АОТ. Тем самым эмпирически оценивается воздействие уменьшения аэрозольной нагрузки на поток прямой солнечной радиации, приходящей к поверхности Земли в безоблачных условиях. Для суммарной радиации это влияние не столь выражено. И наша оценка скорости уменьшения прямой солнечной радиации не противоречит полученным со спутника данным [23] скорости уменьшения потока суммарной отраженной (восходящей) солнечной радиации ($-0.18 \pm 0.11 \text{ Вт/м}^2$ в год (проект ISCCP) и ($-0.13 \pm 0.08 \text{ Вт/м}^2$ в год (проект ERBS) в течение 1984–1999 гг. и предположению, сделанному в [23] о том, что это обусловлено глобальным уменьшением аэрозоля в стратосфере, так называемым явлением “aerosol dimming”.

В большинстве точек наблюдения в рассматриваемый период времени происходил процесс “очистки” атмосферы от аэрозоля. В целом, для российского региона тенденция изменений АОТ отрицательна (рис. 7а), при этом значение абсолютной величины тренда (за 10 лет) меняется от (-0.05) до $(+0.01)$ и в целом растет с юго-запада на северо-восток России. Среднее значение относительной ве-

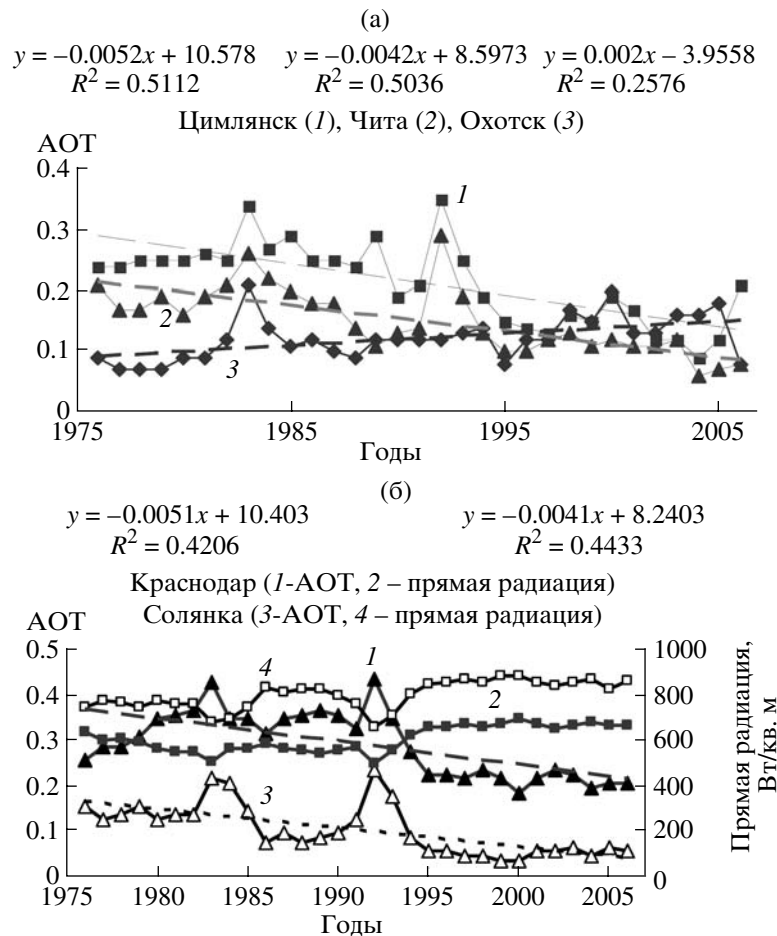


Рис. 6. Временные изменения годовых АОТ и потока прямой солнечной радиации для высоты Солнца 30° : а – многолетний ход годовых АОТ для трех станций (ЕТР, АТР и Приморье), б – многолетний ход годовых АОТ и среднегодового значения потока прямой солнечной радиации при высоте Солнца 30° для двух станций с максимальным и минимальным значением средней АОТ. На обоих графиках анализируемый период времени составляет 1976–2006 г.

личины тренда (-13%) за 10 лет, максимальное – 21% за 10 лет, а минимальное – (-38%) за 10 лет при коэффициенте детерминированности не более 0.5. Очевидно, что при этом должно наблюдаться уменьшение среднего АОТ для всего региона в последнее десятилетие (табл. 2). Наибольшие отрицательные тренды наблюдаются на станции Солянка (юг Красноярского края), Чита (Забайкалье), Хабаровск (Приморье), а также на юге ЕТР. Совокупность двух факторов, глобального очищения стратосферы от трансформированного вулканического аэрозоля и уменьшение антропогенного влияния формируют величину отрицательного тренда в этих районах. Положительные тренды имеют место в Архангельске, на Дальнем Востоке (Камчатка, Охотск); на трех станциях Западной (станции № 18, 19, 90) и на одной Восточной (станция Тура, № 25) Сибири тренды почти нулевые. Причинами положительных тенденций (Архангельск) или уменьшения отрицательных (указанные сибирские станции) могут быть увеличения промышленных выбросов в

регионе, рост числа и интенсивности пожаров, а также сравнительно маломощные вулканические извержения (например, на Камчатке). Сравнение с оценками трендов АОТ и интегральной прозрачности полученными другими авторами [14, 17–21] проводилось нами ранее в [9] и обнаруживает согласование с результатами, представляемыми в данной работе.

Итоги исследований эволюции величины и оптических свойств стратосферного слоя, образовавшегося в атмосфере Земли в результате двух крупнейших вулканических извержений, как с наземных, так и со спутниковых платформ TOMS, TOVS (в процессе выполнения проектов Stratospheric Aerosol and Gas Experiment – SAGE и Stratospheric Aerosol Measurement – SAM) подробно описаны в [23–26]. Совместное использование спутниковой и наземной эмпирической информации позволило создать базу данных, а затем и модели зонального и глобального распределения вулканического сульфатного аэрозоля с вертикальным осреднением на базе

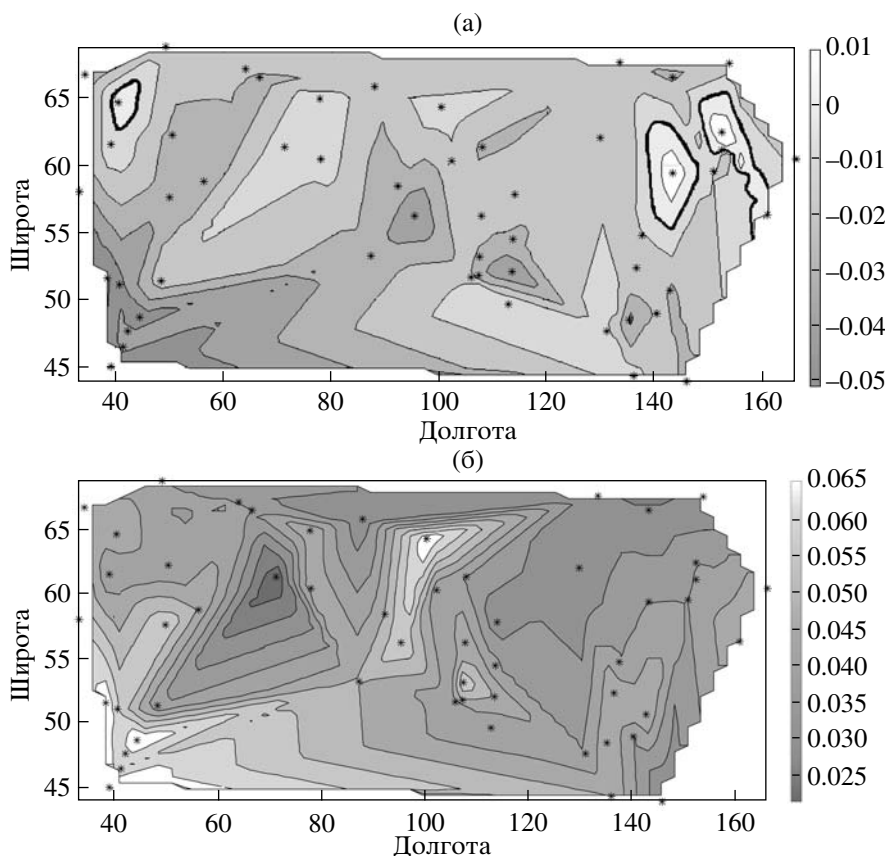


Рис. 7. Пространственные распределения многолетней изменчивости аэрозольной оптической толщины (АОТ): а – “тенденции” временных изменений в последнее 30-тилетие (в абсолютных величинах за 10 лет), б – абсолютная величина стандартного отклонения годовых АОТ по всему периоду наблюдений 1976–2006 гг.

упрощенных параметрических схем атмосферного переноса [27–32].

Мы посчитали целесообразным в заключение привести полученные нами количественные оценки временной эволюции аномалий АОТ для периода 1976–2006 гг. для всех станций российской актинометрической сети наблюдений. На рис. 8а приведена карта-схема пространственно-временного изменения нормированных аномалий годовых значений АОТ на территории России, в качестве нормы выбраны средние значения АОТ для рядов с исключением 1983–1984 и 1992–1993 гг. Аномалии нормированы на стандартное отклонение временного ряда для каждой станции:

$$(\tau_{\text{year}} - \tau_{\text{aver}}) / \sigma_{\tau} = an \tau, \quad (2)$$

где τ_{year} – среднее годовое значение АОТ для данной станции, τ_{aver} – среднее многолетнее значение АОТ для данной станции, σ_{τ} – стандартное отклонение ряда годовых АОТ для данной станции, $an \tau$ – нормированная аномалия АОТ (в долях σ_{τ}).

По рис. 8а можно оценить величину аномалий АОТ в год извержения и после него, время проявления максимального эффекта, составившего $an \tau = 7-8$ долей σ_{τ} для 1983 и 1992 гг. и пространствен-

ное распределение $an \tau$ по территории России. С 1994 г. происходит процесс очищения стратосферы с последующим переходом эффекта в область отрицательных аномалий, характерных для последнего десятилетия. Однако для некоторых станций Сибири, Забайкалья и Дальнего Востока (Тура, Мангут, Рудная Пристань, Охотск, Ключи) и после 1995 г. наблюдаются положительные аномалии, менее выраженные (4–2 долей σ_{τ}) и более короткие, чем в вулканические эпизоды.

Были рассчитаны и аномалии среднегодовых значений приземной температуры:

$$(t_{\text{year}} - t_{\text{aver}}) / \sigma_t = an t, \quad (3)$$

где t_{year} – среднее годовое значение приземной температуры воздуха для данной станции, t_{aver} – среднее многолетнее значение приземной температуры воздуха для данной станции, σ_t – стандартное отклонение ряда годовых значений приземной температуры воздуха для данной станции, $an t$ – нормированная аномалия t (в долях σ_t).

На рис. 8б приведена временная развертка средних по станциям юга ЕТР нормированных годовых аномалий АОТ (сплошная линия), приведены также аналогичные нормированные аномалии для при-

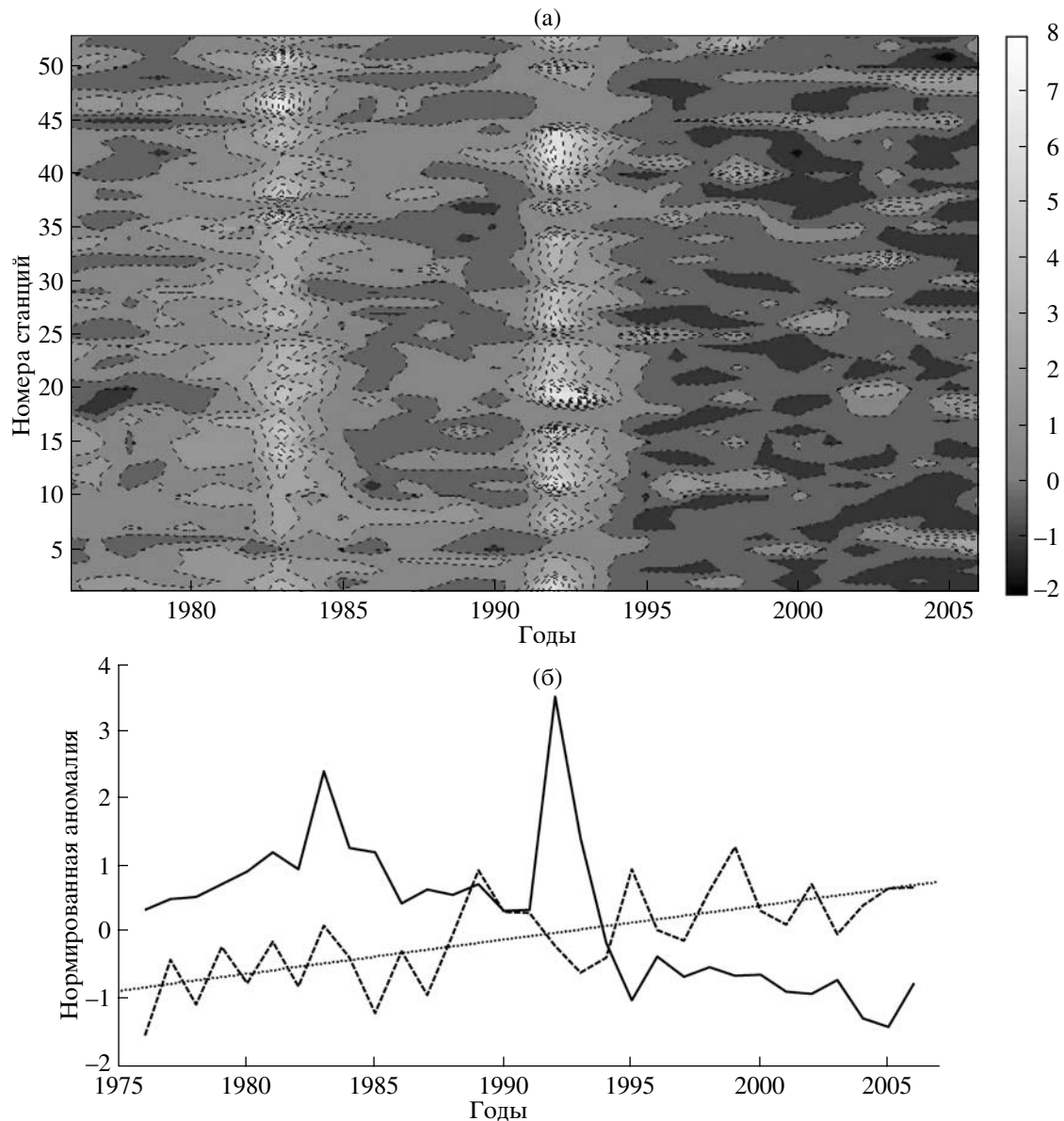


Рис. 8. Контурная карта-схема пространственно-временного распределения нормированных аномалий годовых значений АОТ на территории российского региона в течение 1976–2006 гг. (а), графики временных зависимостей средних нормированных годовых аномалий АОТ (сплошная линия) и температуры приземного воздуха (пунктирная линия) для семи станций юга ЕТР (б).

земной температуры воздуха (пунктирная линия). Отметим, что максимальные отрицательные аномалии температуры наблюдаются в 1985 и 1993 гг., что соответствует годам, следующим за эпизодами вулканических извержений через 3 и 2 года соответственно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного анализа можно сформулировать следующие выводы относительно пространственно-временного распределения АОТ над российским регионом. Пространственное распреде-

ление значений АОТ, средних за 31-летний период рассмотрения в общих чертах соответствует модели глобального распределения атмосферного аэрозоля над Евразией, представленной в третьем и четвертом докладах ИРСС. Это проявляется в уменьшении АОТ с юго-запада на северо-восток при наличии районов постоянной повышенной аэрозольной замутненности на юго-западе и юго-востоке российского региона. На этом фоне проявляются очаги повышенной тропосферной аэрозольной нагрузки, которые более ощутимы при глобальном очищении атмосферы от стратосферного аэрозольного слоя в период с 1995 года. Эти тропосферные источники

связаны либо с антропогенной нагрузкой (города юга России, западной Сибири и Приморья), либо с лесо-тундровыми пожарами в Сибирском регионе, в частности, на станции Тура Эвенкийского округа. Еще одной причиной понижения прозрачности атмосферы на востоке российского региона, проявляющейся в средних годовых АОТ, являются вулканы Камчатки. В целом для российского региона тенденции многолетних изменений в последние десятилетия отрицательны. Однако имеются станции наблюдения, на которых тренды АОТ положительны, это относится, в первую очередь, к станциям Камчатки и Дальнего Востока.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 06-050-65293).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- IPCC. Climate Change 2001. Working Group I. Contribution to the Intergovernmental Panel on Climate Change. Third Assessment Report Climate Change 2001: The Physical Science Basis. http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/wg1/166.html или Cambridge University Press, UK and New York. USA. 2001. 540 p.
- IPCC. Climate Change 2007. Working Group I. Contribution to the Intergovernmental Panel on Climate Change. Fourth Assessment Report of Climate Change: The Physical Science Basis. Ch. 2. P. 130–234.
- Воздействие потепления в Арктике. Эдинбург: Издательство Кембриджского университета, 2004. С. 140.
- Исаев А.А. Экологическая климатология. М.: Научный мир, 2001. 458 с.
- WCRP (World Climate Research Programme). <http://www.wmo.ch/pags/prog/wcrp/pdf/pdf/bsm8rpt.pdf>
- Aerosol robotic Network. http://aeronet.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/type_piece_of_map_opera_v2_new
- Holben B.N., Eck T.F., Slutsker I. et al. AERONET: a federated instrument network and data archive for aerosol characterization // Rem. Sens. Envir. 1998. V. 66. P. 1–16.
- Smirnov A., Holben B.N., Panchenko M.V. et al. Aerosol robotic network activity in Russia, Moldova, Estonia, Belarus, and Ukraine as an example of the mutually beneficial collaborative effort results and prospective // Международный симпозиум стран СНГ. Сб. тезисов “Атмосферная радиация”. МСАР-2006. Пб.: СПб. гос. ун-та, 2006. С. 9–10.
- Плахина И.Н., Махоткина Е.Л., Панкратова Н.В. Вариации аэрозольной оптической толщины атмосферы на территории России в последние 30 лет сезонные изменения и многолетний ход // Метеорология и гидрологи. 2007. № 2. С. 19–29.
- Плахина И.Н., Махоткина Е.Л. Анализ временных изменений прозрачности атмосферы по данным актинометрической сети // Сб. развернутых тезисов Международного симпозиума Физика атмосферы. Наука и образование. Пб.: СПб. гос. ун-т, 2007. С. 65–68.
- Луцко Л.В., Махоткина Е.Л., Клеванцова В.А. Развитие наземных актинометрических наблюдений // Современные исследования Главной геофизической обсерватории. Юбилейный сборник. СПб.: Гидрометеосиздат, 2001. С. 184–202.
- Махоткина Е.Л., Лукин А.Б., Плахина И.Н. Мониторинг интегральной прозрачности атмосферы // Тезисы докладов. Всероссийская конференция “Развитие системы мониторинга состава атмосферы (РСМСА)”. М.: Макс Пресс, 2007. 104 с.
- Тарасова Т.А., Ярхо Е.В. Определение аэрозольной оптической толщины атмосферы по измерениям прямой интегральной радиации // Метеорология и гидрология. 1991. № 12. С. 66–71.
- Ярхо Е.В. Временная изменчивость аэрозольной оптической толщины атмосферы в различных климатических зонах // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 1994. Т. 30. № 3. С. 417–424.
- Абакумова Г.М., Горбаренко Е.В., Чубарова Н.Е. Оценка точности определения аэрозольной оптической толщины и влагосодержания атмосферы по данным стандартных наблюдений на основании сравнений с измерениями солнечным фотометром CIMEL // Международный симпозиум стран СНГ. Сборник тезисов. 2006. “Атмосферная радиация”. МСАР-2006. 27–30 июня 2006 г. Пб.: СПб. гос. ун-т, 2006. С. 43–44.
- Родионов В.Ф., Мариунова М.С., Русина Е.Н. и др. Аэрозольная мутность атмосферы в полярных районах. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 1994. Т. 30. № 6. С. 797–801.
- Русина Е.Н., Родионов В.Ф. Оценка доиндустриальной оптической толщины атмосферы в Арктике и современного вклада антропогенных выбросов // Метеорология и гидрология. 2002. № 5. С. 35–39.
- Абакумова Г.М. Тенденции многолетних изменений прозрачности атмосферы, облачности, солнечной радиации и альбедо подстилающей поверхности в Москве // Метеорология и гидрология. 2000. № 9. С. 51–62.
- Горбаренко Е.В. Аэрозольная составляющая оптической толщины атмосферы как характеристика антропогенного загрязнения над промышленными центрами // Метеорология и гидрология. 1997. № 3. С. 12–18.
- Ерохина А.Е., Лукин А.Б., Горбаренко Е.В. Некоторые тенденции изменения аэрозольной оптической мутности атмосферы в России // Тезисы МСАР-2004. Пб.: СПб. гос. ун-т, 2004. С. 61–62.
- Abakumova G.M., Feigelson E.M., Russak V. et al. Evaluation of long – term changes in radiation cloudness and surface temperature on the territory of the former Soviet Union // J. Climate. 1996. V. 9. P. 1319 – 1327.
- Сайт Группы реагирования на вулканические извержения, KVERT (Kamchatkan Volcanic Eruption Response Team), <http://www.ksnet.ru/ivs/kvert/volcanoes/index.html>.
- IPCC. Climate Change 2007. Working Group I. Contribution to the Intergovernmental Panel on Climate Change. Fourth Assessment Report of Climate Change // The Physical Science Basis, Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. Ch. 9. 677 p.
- Hofmann D., Barnes J., Dutton E. et al. Surface-based observations of volcanic emissions to the stratosphere, in Volcanism and the Earths Atmosphere // Geophys. Monogr.

- 139 / Eds.: A. Robock, C. Oppenheimer. Washington: AGU, 2003. P. 57–73.
25. Stothers R. A chronology of annual mean radii of stratospheric aerosol from volcanic eruptions during the twentieth century as derived from ground-based spectral extinction measurements // *J. Geophys. Res.* 2001. V. 106. № D23. P. 32043–32049.
26. Stothers R. Major optical depth perturbations to the stratosphere from volcanic eruptions: stellar extinction period, 1961–1978 // *J. Geophys. Res.* 2001. V. 106. № D3. P. 2993–3003.
27. Thomason L., Peter T. Assessment of Stratospheric Aerosol Properties // Report on the Assessment Kick-Off Workshop. Paris. France. 2001. SPARC Report № 4. WCRP-124. WMO.2006. <http://www.aero.jussieu.fr>.
28. Sato M., Hansen J.E., McCormick M.P. et al. Stratospheric aerosol optical depths, 1850–1990 // *J. Geophys. Res.* 1993. V. 98. № D12. P. 22987–22994.
29. Stenchikov, G.L., Kirchner I., Robock A. et al. Radioactive forcing from the 1991 Mount Pinatubo volcanic eruption // *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103. № D12. 13837–13857.
30. Hansen J., Sato M., Nazarenko L. et al. Climate forcings in Goddard Institute for Space Studies SI2000 simulations // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107. № D18. 4347. doi: 10.1029/2001JD001143.
31. Ammann C.M., Meehl G.A., Washington W.M. et al. A monthly and latitudinally varying volcanic forcing dataset in simulations of 20th century climate // *Geophys. Res. Lett.* 2003. V. 30. № 12. 1657. doi:10.1029/2003GL016875.
32. Stenchikov G., Hamilton K., Stouffer R. J. et al. Arctic Oscillation response to volcanic eruptions in the IPCC AR4 climate models // *J. Geophys. Res.* 2006. V. 111. № D07107. doi: 10.1029/2005JD006286.

Variations in the Atmospheric Aerosol Optical Depth from the Data Obtained at the Russian Actinometric Network in 1976–2006

I. N. Plakhina^a, N. V. Pankratova^a, and E. L. Makhotkina^b

^a A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, Pyzhevskii per. 3, Moscow, 119017 Russia
e-mail: inna@ifaran.ru

^b Voeikov Main Geophysical Observatory, ul. Karbysheva 7, St. Petersburg, 194021 Russia
e-mail: makhotk@main.mgo.rssi.ru

Received January 15, 2008; in final form, November 13, 2008

Abstract—The results of an analysis of variations in the optical depth of a vertical atmospheric column on the basis of a 30-year (1976–2006) series of observations obtained by the Russian actinometric network are generalized. This analysis is based on the Atmosphere Transparency special-purpose database created at the Voeikov Main Geophysical Observatory on the basis of observational data obtained at the actinometric stations of the Russian Hydrometeorological Research Center. The general regularities of spatial variations in the atmospheric optical depth (AOD) over Russia are revealed: there is a monotonic decrease from the southwest to the northeast, with localized areas having different aerosol loads due to the global and regional factors of their formation. A spatiotemporal structure of the anomalies of AOD annual values within the time interval under consideration, including the El Chichon (1982) and Pinatubo (1991) eruptions, is studied.