

ИЗМЕНЧИВОСТЬ АЭРОЗОЛЬНО-ОПТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ АТМОСФЕРЫ В СЕВЕРНОЙ И ЮЖНОЙ ПОЛЯРНЫХ ОБЛАСТЯХ ПОСЛЕ 2000 г.

канд. геогр. наук Е.Н.РУСИНА, канд. геогр. наук В.Ф.РАДИОНОВ,
канд. физ.-мат. наук Е.Е.СИБИР

ГНЦ РФ Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, e-mail: rusina@aari.ru; vradion@aari.ru

В статье представлены новые, полученные после 2000 г., результаты анализа данных наблюдений за аэрозольной оптической толщиной и показателем селективности аэрозольного ослабления на станциях международной сети AERONET в северной и южной полярных областях.

За тот же период приведены данные измерений интегральной оптической толщины атмосферы на российских полярных станциях. Они сопоставлены с аналогичными данными российских станций фоновое мониторинга состояния атмосферы. Выявлены особенности изменения аэрозольно-оптических параметров в начале настоящего века по сравнению с концом предыдущего.

Ключевые слова: аэрозольная оптическая толщина, показатель селективности, интегральная оптическая толщина, Арктика, Антарктида, AERONET.

ВВЕДЕНИЕ

Интерес к изучению оптических свойств атмосферного аэрозоля связан с тем, что он является одним из основных климатообразующих факторов. Первые количественные оценки характеристик аэрозольного ослабления солнечного излучения в атмосфере были получены из данных спектральных наблюдений за прямой солнечной радиацией [Ångström, 1961; Ångström, 1964; International operations handbook..., 1978]. Широкое распространение такого рода наблюдений началось под эгидой ВМО в 1970-х гг., когда заработала международная сеть фоновое мониторинга атмосферы – BAPMoN (Background Air Pollution Monitoring Network) [International operations handbook..., 1978]. В 1989 г. эта сеть была преобразована в Глобальную службу атмосферы – ГСА (Global Atmosphere Watch) [Global Atmospheric Background Monitoring..., 1992]. Наблюдения за аэрозольно-оптическими характеристиками атмосферы входили в обязательную программу измерений на всех пунктах наблюдений этих двух сетей [Forgan et al., 1993; Русина, 1991].

В настоящее время наиболее широкая наземная сеть спектральных наблюдений за характеристиками аэрозольной составляющей атмосферы – это поддерживаемая NASA международная сеть AERONET (Aerosol Robotic Network). На станциях AERONET, оснащенных сканирующими спектральными радиометрами «Cimel», в режиме реального времени проводятся измерения прямой солнечной радиации на длинах волн 340, 380, 440, 500, 675, 870, 936 и 1020 нм [Abdou et al., 2005; Dubovik et

al., 2002; Dubovik et al., 2000]. По результатам этих измерений вычисляются, в частности, величины спектральной аэрозольной оптической толщины $\tau(\lambda)$ на указанных длинах волн и параметр селективности (экспонента Ангстрема) α , характеризующий характер распределения аэрозольных частиц по размерам.

В настоящей работе представлены результаты наблюдений за аэрозольной оптической толщиной (АОТ), параметром селективности α и интегральной оптической толщиной атмосферы (ИОТ), полученные после 2000 г. на ряде станций международной сети AERONET в Арктике и Антарктике, а также на российских полярных и среднеширотных станциях. Мы попытались выяснить, произошли ли какие-либо изменения в уровнях аэрозольного загрязнения атмосферы в северной и южной полярных областях после 2000 г. по сравнению с концом прошлого века.

АНАЛИЗИРУЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ И ПУНКТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Для характеристики аэрозольного ослабления в атмосфере наиболее часто используется аэрозольная оптическая толщина $\tau(\lambda)$ на длине волны 500 нм – $\tau(500)$.

Для описания спектрального хода АОТ используется закон Ангстрема [Ångström, 1964]

$$\tau(\lambda) = \beta \cdot \lambda^{-\alpha}. \quad (1)$$

Параметр Ангстрема β численно равен аэрозольной оптической толщине на длине волны 1000 нм. Величина параметра селективности α (экспонента Ангстрема) зависит от микрофизических характеристик аэрозольных частиц, в первую очередь – от их размера. При преобладании в воздухе крупных частиц, когда $\alpha \rightarrow 0$, аэрозольная оптическая толщина не зависит от длины волны. Увеличение α означает, что в воздухе начинает превалировать мелкодисперсный аэрозоль, а при $\alpha = 4$ имеет место предельный случай – рэлеевское рассеяние на молекулах воздуха. Средние условия аэрозольного замутнения атмосферы характеризуются значением $\alpha \approx 1,3$.

На российских станциях фонового мониторинга ВАРМоN – GAW спектральные актинометрические наблюдения за АОТ [Русина, 1991; Русина, 1997], проводившиеся с 1972 г., были прерваны в 1993 г. Для косвенной оценки степени замутнения/прозрачности атмосферы на станциях российской актинометрической сети часто используется интегральная оптическая толщина (ИОТ) атмосферы τ_2 , связанная с коэффициентом интегральной прозрачности P_2 соотношением

$$\tau_2 = -\ln P_2. \quad (2)$$

Величина ИОТ вычисляется по данным актинометрических измерений прямой солнечной радиации по формуле

$$\tau_2 = -(\sin h + 0,204) \cdot \ln (S(h) / S_0) / 1,41, \quad (3)$$

где $S(h)$ – прямая солнечная радиация ($\text{кВт}/\text{м}^2$), измеренная при высоте Солнца h , приведенная к среднему расстоянию между Землей и Солнцем; S_0 – прямая солнечная радиация на верхней границе атмосферы (заатмосферная постоянная).

По существу, ИОТ представляет собой оптическую толщину атмосферы для прямой солнечной радиации в диапазоне длин волн $\Delta\lambda = 0,3\text{--}4$ мкм при оптической массе $m = 2$. Изменения ИОТ в этом диапазоне длин волн в основном определяются изменением содержания в атмосфере аэрозоля и водяного пара [Радионон и др., 1994].

В табл. 1 приведен список станций и выполнявшиеся на них виды наблюдений, результаты которых анализируются в статье.

Таблица 1

Список станций, их принадлежность к сетям наблюдений и измерявшиеся на станциях параметры, анализируемые в статье

№	Станция	Сеть	Измеряемые параметры
1	South Pole	AERONET	АОТ
2	Мирный	Актинометрическая РФ	АОТ, ИОТ
3	Новолазаревская	Актинометрическая РФ	ИОТ
4	Восток	Актинометрическая РФ	ИОТ
5	Andenes	AERONET	АОТ, α
6	Hornsund	AERONET	АОТ, α
7	Kangerlussuaq	AERONET	АОТ, α
8	Longyearbyen	AERONET	АОТ, α
9	Ny Alesund	AERONET	АОТ, α
10	Opal	AERONET	АОТ, α
11	Pearl	AERONET	АОТ, α
12	Resolute Bay	AERONET	АОТ, α
13	Sodankyla	AERONET	АОТ, α
14	Thule	AERONET	АОТ, α
15	Тикси	AERONET	АОТ, α
16	Архангельск	Актинометрическая РФ	ИОТ
17	Белый Нос	Актинометрическая РФ	ИОТ
18	Бугрино	Актинометрическая РФ	ИОТ
19	о. Врангеля	Актинометрическая РФ	ИОТ
20	о. Диксон	Актинометрическая РФ	ИОТ
21	Елецкая	Актинометрическая РФ	ИОТ
22	Оленёк	Актинометрическая РФ	ИОТ
23	Сеяха	Актинометрическая РФ	ИОТ
24	Уэлен	Актинометрическая РФ	ИОТ
25	м. Челюскин (обс. им. Е.К.Федорова)	Актинометрическая РФ	ИОТ

РЕЗУЛЬТАТЫ

Эффект влияния аэрозольной составляющей атмосферы на величину $\tau(\lambda)$ можно продемонстрировать на основе данных ее измерений в Антарктиде. Антарктическая атмосфера практически свободна от влияния антропогенных источников аэрозоля, а ее общее влагосодержание изменяется в очень узких пределах в течение как года в целом, так и, особенно, в течение светлого времени, когда выполняются солнечные фотометрические наблюдения. Существенные понижения прозрачности атмосферы за счет увеличения аэрозольного замутнения в Антарктиде наблюдались только после сильных вулканических извержений [Tomasi et al., 2012].

На рис. 1а, б показаны среднесуточные значения $\tau(500)$, измеренные в обсерватории Мирный в антарктический сезон (с августа по апрель) 2011/12 г. и в первую половину сезона 2012/13 г., в сравнении с их средними многолетними значениями за период наблюдений 1982–2011 гг. Средние многолетние значения рассчитывались для

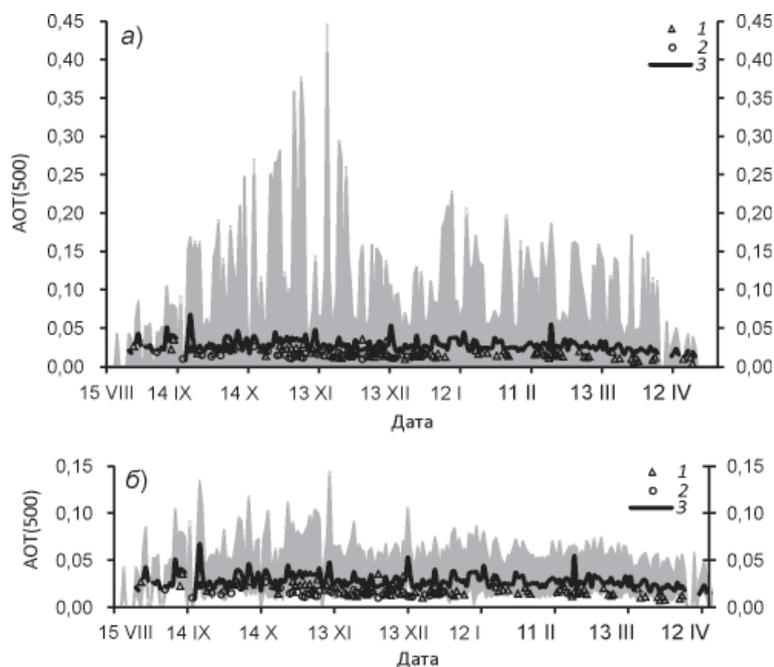


Рис. 1. Среднесуточные значения $\tau(500)$, измеренные в обсерватории Мирный в сезоны 2011–2012 гг. (1), 2012 г. (2) на фоне их многолетних средних значений за измерительные периоды 1985–89 и 1995–2011 гг., свободные от влияния вулканических замутнений атмосферы (3). Серым цветом выделены области, характеризующие амплитуды изменчивости $\tau(500)$ с учетом аэрозольного замутнения вулканическими выбросами (а) и в периоды без вулканического замутнения (б).

периодов 1985–1989 и 1995–2011 гг., когда на величине аэрозольной оптической толщины не сказывалось влияние извержений вулканов Эль-Чичон, Пинатубо и Хадсон [Радионов и др., 2011]. На этих рисунках серым фоном выделены области значений, расположенных в интервале между минимальными и максимальными среднесуточными значениями $\tau(500)$ как с учетом влияния аэрозольного замутнения атмосферы после сильных вулканических извержений, так и свободных от такого влияния. На рис. 1а экстремальные значения рассчитывались за все годы наблюдений, а на рис. 1б при их расчете исключены периоды, в течение которых сказывалось влияние вулканических извержений. На этих рисунках особенно заметно, насколько существенно влияет аэрозольное замутнение атмосферы после сильных вулканических извержений на величину $\tau(500)$.

Многолетняя изменчивость средних месячных значений $\tau(500)$ на арктических станциях AERONET и антарктических станциях Мирный и South Pole приведена на рис. 2.

На нем отчетливо видно, что внутригодовая изменчивость на станциях AERONET в Арктике и Антарктике заметно отличается. На антарктических станциях среднемесячные значения мало меняются в течение года. Внутригодовая изменчивость АОТ на арктических станциях существенно выше по сравнению с антарктическими станциями. Это связано с различными механизмами формирования аэрозольной составляющей в атмосфере северной и южной полярных областей. Арктическая

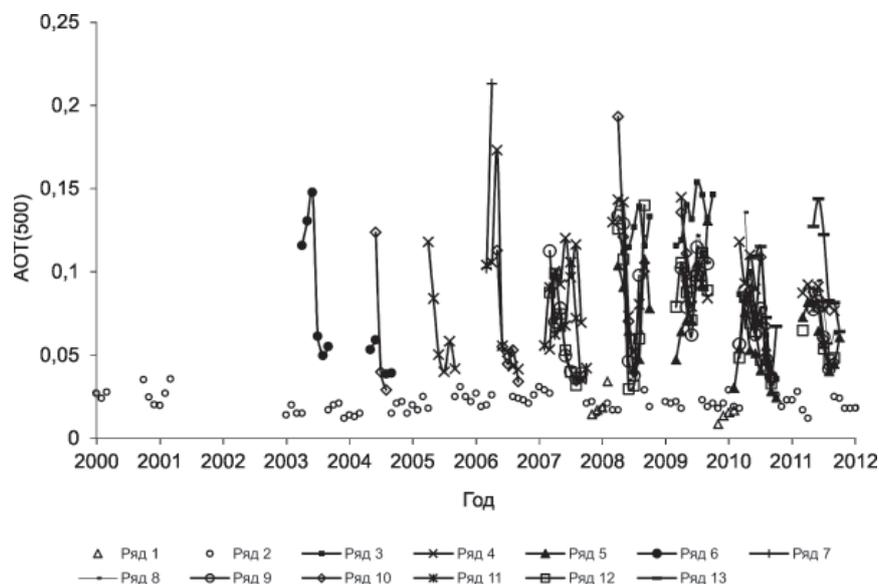


Рис. 2. Многолетняя изменчивость средних месячных значений AOT (500) на антарктических станциях South Pole (1), Мирный (2) и арктических станциях сети AERONET (3–13, показаны разными значками).

атмосфера существенным образом подвержена влиянию переносов загрязняющих примесей от источников умеренных широт в высокие, а Антарктида свободна от такого влияния [Радионов и др., 2011].

Как видно из рис. 2, за исследуемый период средние месячные величины $\tau(500)$ на антарктических станциях не превышали значения 0,05. На арктических станциях в зимне-весенний период аэрозольная оптическая толщина была значительно больше, чем в Антарктиде. Кроме того, на большинстве арктических станций AERONET в 2009 г. был зарегистрирован значительный рост как среднемесячных, так и средних за сезон наблюдений значений аэрозольной оптической толщины. Обычно подобное повышение AOT может следовать за крупным извержением вулкана. Однако в 2008–2009 гг. хотя и проявлялась вулканическая деятельность (например, извержение вулкана Сарычев и ряда других), но масштабы этих извержений, скорее всего, не могли оказать столь значительное влияние на AOT. Можно предположить, что такой рост AOT был связан с особенностями атмосферной циркуляции в эти годы и «дополнительным» переносом аэрозольных загрязнений в высокие широты. Статистически значимых многолетних трендов возрастания AOT(500) на арктических станциях AERONET тем не менее не наблюдалось. В Антарктиде подобных явлений не отмечалось.

Микрофизические характеристики аэрозольной составляющей атмосферы на станциях AERONET в Арктике после 2000 г. менялись в пределах их обычной изменчивости: средние месячные значения показателя селективности α за период наблюдений с 2000 по 2011 г. изменялись в пределах от 0,98 до 1,59. Среднее за эти годы значение α по данным наблюдений на этих станциях составляет $\alpha = 1,34 \pm 0,18$, т.е. обычно наблюдаемое среднее значение.

На рис. 3а показано изменение среднемесячных значений интегральной оптической толщины за 2000–2011 гг. на российских станциях в Арктике и Антарктиде.

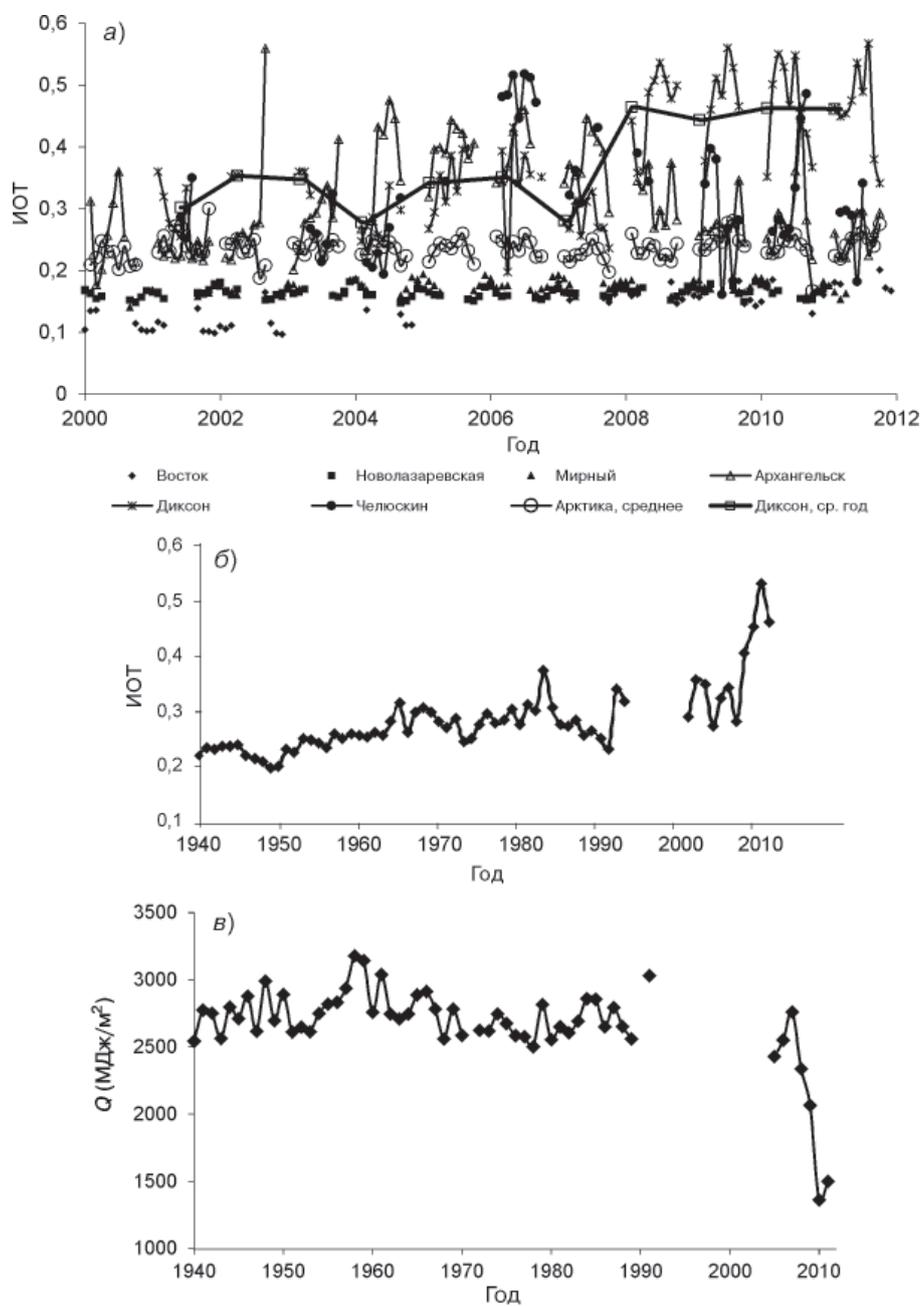


Рис. 3. Среднемесячные значения ИОТ на российских арктических и антарктических станциях и среднегодовые значения ИОТ на о. Диксон в 2000–2012 гг. (а); многолетняя изменчивость средних весенних (март–апрель) значений ИОТ (б) и годовых сумм суммарной радиации Q (МДж/м²) (в) на станции о. Диксон в 1940–2011 гг.

Как видно из рис. 3а, среднемесячные значения τ_2 на антарктических станциях не превышают значения 0,2, а на арктических 0,4, т.е. верхние граничные значения для среднемесячных значений в Арктике вдвое превышают таковые в Антарктиде.

Следует отметить, что на трех российских арктических станциях после 2000 г. средние месячные значения ИОТ существенно превышали величину 0,4. Это станции: Архангельск в 2002–2007 гг., м. Челюскин (обс. им. Е.К.Федорова) в 2006 г. и о. Диксон начиная с 2008 г.

В Архангельске на величине интегральной оптической толщины могло сказаться влияние городских промышленных источников загрязнения. Причины, вызвавшие рост ИОТ на о. Диксон и м. Челюскин, скорее всего, связаны с воздействием локальных источников загрязнения.

На о. Диксон возрастание ИОТ сопровождалось существенным уменьшением годовых сумм приходящей к поверхности солнечной радиации. Это отчетливо видно на рисунках 3б, в. На них показан многолетний ход средних весенних (март–апрель) значений ИОТ и годовых сумм суммарной радиации за весь период наблюдений на этой станции. Поскольку на других станциях актинометрической сети в Арктике не отмечено уменьшения годовых сумм солнечной радиации, то можно с уверенностью заключить, что на о. Диксон это связано или с плохим качеством наблюдений, или с влиянием локальных источников замутнения атмосферы. В частности, по имеющейся информации, на о. Диксон вблизи площадки для наблюдений была установлена дизельная электростанция, факел выбросов которой и влиял на результаты актинометрических наблюдений. Таким образом, начиная с 2008 г. информацию по этой станции с точки зрения мониторинга регионального фона ИОТ и параметров радиационного режима следует считать сомнительной.

Резкие изменения этих характеристик с 2008 г. ярко иллюстрируют, насколько значимое влияние могут оказать локальные источники загрязнения на измеряемые характеристики солнечной радиации и прозрачности атмосферы.

Систематических изменений ИОТ на остальных рассматриваемых арктических станциях не наблюдалось.

Сравнение данных по интегральной оптической толщине, полученных на российских полярных станциях и на станциях фоновых мониторинга состояния атмосферы, расположенных в средних широтах России, представлено на рис. 4.

Как видно из рисунка, самые низкие среднегодовые значения τ_2 наблюдались на антарктической станции Мирный. Они не превышают величины 0,18. Несколько более высокие значения ИОТ получены на станции фоновых мониторинга Шаджатмаз, расположенной на Северном Кавказе на высоте 2070 м. Однако на этой станции среднегодовые значения, так же как и в Мирном, не превышают граничного уровня ИОТ ($\tau_2 = 0,2$). Следует отметить, что Шаджатмаз является единственной станцией на территории России, которая по своим природным и климатическим условиям приближается к требованиям, предъявляемым Всемирной метеорологической организацией к «глобальным» фоновым станциям, созданным для регистрации изменений глобального фоновых уровня загрязнения атмосферы [International operations handbook..., 1978].

Остальные среднеширотные фоновые станции – Усть-Вымь (Республика Коми), Памятная (Западная Сибирь на границе с Южным Уралом), Туруханск (Западная Сибирь, Красноярский край) и Хужир (Восточная Сибирь, остров на оз. Байкал) – являются «региональными». Результаты измерений на них отражают степень за-

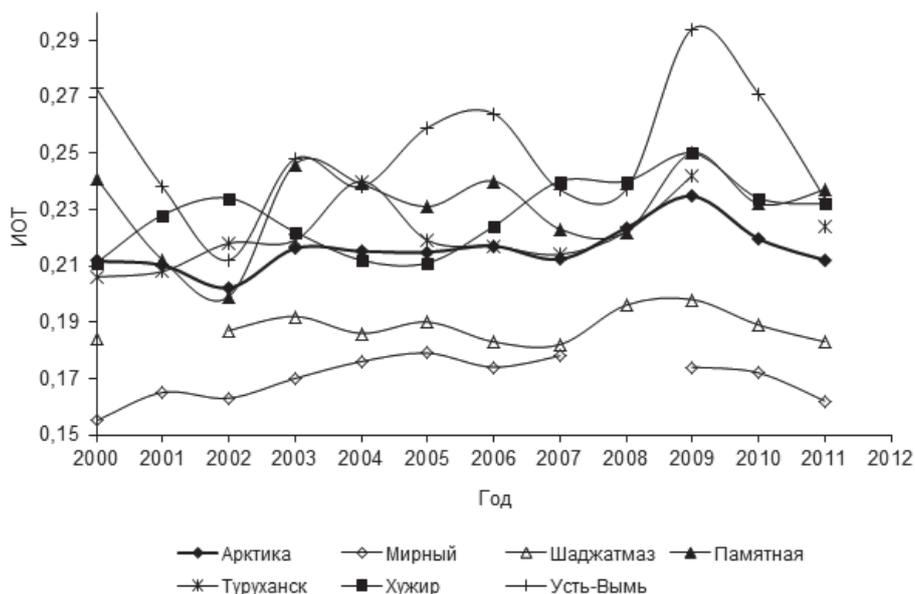


Рис. 4. Среднегодовые значения ИОТ на российских актинометрических станциях (за исключением станций Архангельск, о. Диксон и м. Челюскин); в obs. Мирный (Антарктида) и на среднеширотных станциях фонового мониторинга в РФ (Памятная, Шаджатмаз, Туруханск, Хужир, Усть-Вымь).

грязнения своего региона вне промышленных центров. Среднегодовые значения ИОТ на среднеширотных и арктических станциях близки по величине и колеблются в интервале $0,2 < \tau_2 \leq 0,3$ (рис. 4).

Следует заметить, что как на арктических станциях (кроме станций Архангельск, о. Диксон и м. Челюскин), так и на среднеширотных российских станциях статистически значимых систематических изменений оптической толщины атмосферы после 2000 г. выявлено не было.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подытоживая результаты, полученные после 2000 г. на антарктических и арктических станциях, можно выделить следующие моменты:

1. Средние месячные значения $\tau(500)$ на антарктических станциях AERONET за истекший период настоящего века не превышали значения 0,05 (что соответствует ранее полученным результатам) и 0,15 на арктических станциях (за исключением отдельных случаев).

2. В 2009 г. на большинстве арктических станций AERONET зарегистрировано значительное повышение средних месячных и средних за сезон наблюдений величин $\tau(500)$. В Антарктиде подобных явлений в 2009 г. не наблюдалось.

3. Среднее значение показателя селективности аэрозольного ослабления α на станциях AERONET после 2000 г. составило $\alpha = 1,34 \pm 0,18$, т.е. среднюю величину, характерную для аэрозольной составляющей атмосферы в обычном невозмущенном состоянии.

4. Средние месячные значения интегральной оптической толщины атмосферы τ_2 на антарктических станциях не превосходили уровня 0,2. На арктических станциях

этот уровень был в 2 раза выше и составлял 0,4. Исключением оказались городская станция Архангельск и станции на о. Диксон, начиная с 2008 г., и м. Челюскин в 2006 г., где τ_2 превысила значение 0,4. Причиной этого, очевидно, стало влияние антропогенных городских (в Архангельске) и локальных источников загрязнения атмосферы.

5. По параллельным наблюдениям за $\tau(500)$ и τ_2 в обсерватории Мирный $\tau(500)$ в среднем составляет 12 % от интегральной оптической толщины атмосферы при атмосферной массе $m = 2$.

6. За истекший период нового века статистически значимых трендов $\tau(500)$ и τ_2 на станциях СПО и ЮПО, а также на среднеширотных станциях фоновых мониторинга атмосферы не прослеживается.

7. Доброкачественные, надежные данные о солнечной радиации и аэрозольно-оптических параметрах атмосферы можно получать лишь при восстановлении службы регулярных инспекций и проверок на станциях полярных областей.

Работа выполнена в рамках темы Росгидромета ЦНТП 1.3.1.2.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Радионов В.Ф., Мариунова М.С., Русина Е.Н., Лубо-Лесниченко К.Е., Пиманова Ю.Е. Аэрозольная мутность атмосферы в полярных областях // Изв. АН. Физика атмосферы и океана. 1994. Т. 30. № 6. С. 797–801.

Радионов В.Ф., Русина Е.Н., Сакерин С.М., Сибир Е.Е., Смирнов А.В. Составляющие радиационного баланса и аэрозольно-оптические параметры атмосферы в Антарктике в период МПГ на фоне их многолетней изменчивости // Вклад России в Международный полярный год 2007/08. Метеорологические и геофизические исследования. М.; СПб.: ООО «Паулсен», 2011. С. 158–169.

Русина Е.Н. Определение аэрозольной мутности по данным спектральных актинометрических наблюдений // Руководство по контролю загрязнения атмосферы. РД 52. 04.186 – 89. М.: Гидрометеоздат, 1991. С. 590–597.

Русина Е.Н. Оценка качества информации об аэрозольной мутности атмосферы на международной сети фоновых мониторинга БАПМОН // Труды ГГО. 1997. Вып. 544. С. 166–175.

Abdou W.A., Diner D.J., Martonchik J.V., Bruegge C.J., Kahn R.A., Gaitley B.J., Crean K.A., Remer L.A., Holben B. Comparison of coincident MISR and MODIS aerosol optical depths over land and ocean scenes containing AERONET sites // J. Geophys. Res. 2005. doi:10.1029/2004JD004693.

Ångström A. Techniques of determining the turbidity of the atmosphere // Tellus. 1961. Vol. 13. №2. P. 214–223.

Ångström A. The parameters of atmospheric turbidity // Tellus. 1964. Vol. 16. P. 64–75.

Dubovik O., Holben B.N., Eck T.F., Smirnov A., Kaufman Y.J., King M.D., Tanre D., Slutsker I. Variability of absorption and optical properties of key aerosol types observed in worldwide locations // J. Atm. Sci. 2002. Vol. 59. P. 590–608.

Dubovik O., Smirnov A., Holben B.N., King M.D., Kaufman Y.J., Eck T.F., Slutsker I. Accuracy assessments of aerosol optical properties retrieved from AERONET sun and sky-radiance measurements // J. Geophys. Res. 2000. Vol. 105. P. 9791–9806.

Forgan B.W., Deluisi J.J., Hicks B.B., Rusina E.N. Report on the Measurements of Atmospheric Turbidity in BAPMoN. 1993. WMO TD No. 603. 77 p.

Global Atmospheric Background Monitoring for Selected Environmental Parameters. 1992. WMO TD No. 562. 69 p.

International operations handbook for measurement of background atmospheric pollution. 1978. WMO No. 491. 110 p.

Tomasi C., Lupi A., Mazzola M., Stone R.S., Dutton E.G., Herber A., Radionov V.F., Holben B.N., Sorokin M.G., Sakerin S.M., Terpugova S.A., Sobolewski P.S., Lanconelli C., Petrov B.H., Busetto M., Vitale V. An update on polar aerosol optical properties using POLAR-AOD and other measurements performed during the International Polar Year // Atmospheric Environment. 2012. Vol. 52. P. 1–19.

E.N.RUSINA, V.F.RADIONOV, E.E.SIBIR

**VARIABILITY OF AEROSOL AND OPTICAL PARAMETERS
OF THE ATMOSPHERE IN NORTHERN AND SOUTHERN POLAR REGIONS
AFTER 2000**

The paper presents new, received after 2000 year, results of observations of aerosol optical depth and aerosol Ångström's exponent for the international network AERONET stations in northern and southern polar regions.

For the same period data of actinometrical measurements of atmospheric transparency at the Russian polar stations are presented. They are compared with similar data of the Russian background stations of air pollution monitoring. Features of change of aerosol and optical parameters at the beginning of the real century in comparison with the end of the previous are revealed.

Keywords: aerosol optical depth, selectivity exponent, atmospheric transparency, Arctic, Antarctic, AERONET.