

## СПЕЦИФИКА МНОГОЛЕТНЕЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ СУММАРНОЙ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ И ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЗРАЧНОСТИ АТМОСФЕРЫ В ПОЛЯРНЫХ ОБЛАСТЯХ

В.Ф.РАДИОНОВ, Е.Н.РУСИНА, Е.Е.СИБИР

ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт

*В статье представлены результаты обобщения и анализа данных наблюдений суммарной радиации и интегральной прозрачности атмосферы на российских антарктических и арктических станциях и высокогорной среднеширотной станции Шаджатмаз, а также аэрозольной оптической толщины атмосферы на длине волны 500 нм в обсерватории Мирный в Антарктиде. Описан характер многолетних, межгодовых и сезонных изменений этих параметров.*

*Более чем за 50-летний период наблюдений суммарной радиации не наблюдалось статистически значимых трендов изменения ее годовых сумм в обеих полярных областях. Значения спектрального аэрозольного ослабления солнечной радиации в Антарктиде являются одними из наиболее низких на Земле и, по существу, характеризуют «начальную границу» естественного глобального фона аэрозольного замутнения атмосферы. Существенное влияние на параметры аэрозольной мутности атмосферы в обеих полярных областях оказывают мощные извержения вулканов, сказывающиеся на величинах аэрозольного ослабления прямой солнечной радиации на протяжении полутора и более лет после извержения.*

*Величины аэрозольного ослабления солнечной радиации и интегральная прозрачность арктической атмосферы в весенний период формируются под влиянием переноса антропогенных выбросов в Арктику от источников, находящихся в умеренных широтах Северного полушария, и могут рассматриваться в качестве косвенных показателей интенсивности антропогенной нагрузки.*

В работе приведены результаты исследований многолетней динамики суммарной солнечной радиации и характеристик спектральной и интегральной прозрачности атмосферы в южной и северной полярных областях (ЮПО и СПО). Для анализа были использованы месячные и годовые суммы суммарной радиации, а также результаты наблюдений за интегральной и спектральной прозрачностью атмосферы, полученные на отдельных российских антарктических и арктических станциях за длительные периоды наблюдений. Данные по прозрачности были сопоставлены с данными российской высокогорной станции фонового мониторинга атмосферы, расположенной на 43° с.ш. на Северном Кавказе.

Радиационный режим полярных областей определяется их географическим положением, структурой атмосферы и облачности, характером подстилающей поверхности [1–5, 7, 8]. Суммарная солнечная радиация зависит от прозрачности атмосферы, количества и типа облачности и, отчасти, от свойств подстилающей поверхности. Следует отметить, что радиационный климат Антарктики слабо подвержен антропогенным воздействиям, поэтому его изучение актуально для анализа естественных изменений климата.

На рис. 1 приведены годовые суммы суммарной радиации ( $Q$ ) на антарктических и арктических российских станциях за многолетние периоды работы, различные для каждой станции.

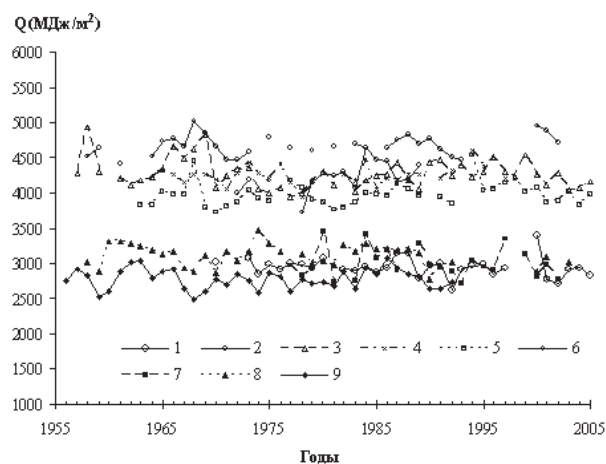


Рис. 1. Изменения годовых сумм суммарной радиации на станциях южной и северной полярных областей: 1 – Беллинсгаузен, 2 – Восток, 3 – Ленинградская, 4 – Мирный, 5 – Молодежная, 6 – Новолазаревская, 7 – Архангельск, 8 – о. Врангеля, 9 – м. Челюскин

Обращает на себя внимание, что, несмотря на существенные отличия между станциями в обеих полярных областях, ряды данных объединились в две совокупности – для антарктических (верхняя) и арктических (нижняя) станций. Суммарная радиация на антарктических станциях колеблется в интервале 3723–5033 МДж/м<sup>2</sup>, а на арктических станциях суммы  $Q$  существенно ниже, максимальный интервал их изменений составляет 2481–3469 МДж/м<sup>2</sup>. По-видимому, столь значительная разница в суммарной радиации связана с большей облачностью и влажностью в Арктике по сравнению с Антарктидой.

Единственной станцией ЮПО, данные которой попали в «арктическую совокупность», является станция Беллинсгаузен. Она расположена на оконечности Антарктического полуострова (62,2° ю.ш., 58,9° з.д.) и в силу специфики метеорологических условий практически в течение всего года отличается очень высокой облачностью (8–9 баллов) и высокой влажностью. Доля рассеянной радиации составляет здесь более 70 %.

Основной особенностью межгодовой изменчивости суммарной радиации в обеих полярных областях является отсутствие за 50-летний период статистически значимых положительных или отрицательных трендов в поступлении суммарной радиации, несмотря на определенные отличия в колебаниях  $Q$ , имеющих на каждой станции. При этом на изменении суммарной радиации ( $Q$ ) практически не сказываются колебания прозрачности атмосферы, даже очень значительные, связанные с вулканической деятельностью. В этих случаях уменьшение прямой радиации компенсируются возрастанием рассеянной радиации.

Наибольший годовой приход суммарной радиации наблюдается в Центральной Антарктиде (ст. Восток, высота 3,5 км над уровнем моря), где мало влагосодержание атмосферы и вся поверхность покрыта снегом и льдом, а также преобладает облачность верхнего яруса. Относительный вклад прямой и рассеянной радиации в суммарную в Антарктиде мало изменяется от месяца к месяцу. Доля рассеянной радиации в приходе суммарной в Центральной Антарктиде 20–25 %. На прибрежных станциях Антарктиды годовой приход суммарной радиации несколько меньше, что во многом связано со спецификой формирования облачности над Антарктидой. Доля рассеянной радиации здесь 45–50 %.

В Российской Арктике по характеру общей циркуляции можно выделить 3 района – Западный, Центральный и Восточный. На рис. 1 их соответственно представляют станции Архангельск, мыс Челюскин (обсерватория им. Федорова) и о. Врангеля. Для Западного района характерна высокая повторяемость северо-атлантических циклонов, приводящих к увеличению облачности и росту аэрозольного загрязнения. Центральный район зимой находится под воздействием сибирского антициклона, что проявляется в более низкой температуре, меньшей облачности (хотя летом облачность значительна) и более редких осадках. Восточный район зимой подвержен влиянию тихоокеанских циклонов, повторяемость которых меньше, нежели повторяемость циклонов в Западном районе. Летний период для Арктики является наиболее облачным. Облачность может снижать поступление прямой радиации до 70–80 %, увеличивая при этом рассеянную радиацию. В результате суммарная радиация уменьшается лишь на 20–50 % в зависимости от сезона. Соотношение прямой и рассеянной радиации в приходе суммарной радиации существенно меняется в зависимости от района. Однако на большей части Арктики в течение года рассеянная радиация по величине превосходит прямую.

На приход суммарной радиации влияет общая (или интегральная) прозрачность атмосферы. Ее показателем является коэффициент прозрачности  $P_2$ , приведенный к оптической массе атмосферы  $m = 2$ . Он вычисляется по данным интегральных измерений потоков прямой солнечной радиации на уровне земной поверхности и характеризуется интегральное ослабление солнечного излучения как за

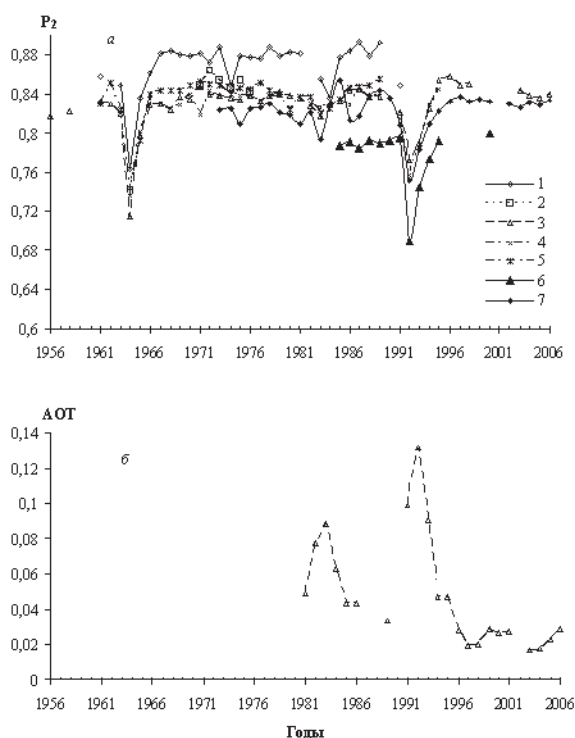


Рис. 2. Межгодовая изменчивость прозрачности атмосферы (а): на антарктических станциях (1 – Восток, 2 – Ленинградская, 3 – Мирный, 4 – Молодежная, 5 – Новозазаревская) и на о-ве Врангеля, 6 – в Арктике и на станции Шаджатмаз, 7 – на Сев. Кавказе) и многолетняя изменчивость аэрозольной оптической толщины атмосферы на длине волны 500 нм (б) в obs. Мирный (Антарктида)

счет аэрозольной компоненты, так и за счет релеевского рассеяния и поглощения атмосферными газами (в первую очередь – водяным паром).

На рис. 2а приведена межгодовая изменчивость прозрачности атмосферы на антарктических станциях. На этот же график нанесены среднегодовые значения  $P_2$ , полученные в Восточной Арктике на о. Врангеля и для сравнения характеристики прозрачности по среднеширотной станции фонового мониторинга Шаджатмаз, действующей на Северном Кавказе, за период с 1973 по 2006 г.

Из рис. 2а хорошо видно, что самая высокая прозрачность характерна для антарктической станции Восток. Среднегодовые значения  $P_2$  колеблются относительно среднего уровня прозрачности  $P_2 = 0,880$ . Аналогичные значения на остальных станциях ЮПО варьируют относительно  $P_2 = 0,840$ . В последнее десятилетие значения  $P_2$  на станциях ЮПО находятся на уровне фоновых значений. В предшествующие десятилетия прозрачность атмосферы в Антарктиде существенно уменьшалась лишь после сильных вулканических извержений: Агунг в марте 1963 г., Эль-Чичон в апреле 1982 г. и Пинатубо в июне 1991 г. В межвулканические периоды как прозрачность атмосферы, так и аэрозольное ослабление были стабильны и находились в пределах естественной изменчивости их невозмущенных значений.

Как следует из рис. 2а, конфигурация межгодовой изменчивости  $P_2$  в Арктике абсолютно повторяет таковую на антарктических станциях, но на протяжении всего периода наблюдений остается несколько более низкой, чем в Антарктиде. Среднее многолетнее значение  $P_2$  составляет 0,780.

Прозрачность на среднеширотной фоновой станции Шаджатмаз колеблется относительно среднего уровня 0,820, а характер межгодовой изменчивости идентичен станциям ЮПО и СПО. В настоящее время станция Шаджатмаз является единственной среднеширотной российской фоновой станцией, отражающей глобальные изменения прозрачности атмосферы на фоновом уровне.

Анализ данных о прозрачности атмосферы во всех рассматриваемых регионах показал отсутствие значимого тренда этих параметров в периоды стабильного состояния атмосферы.

Непосредственную информацию об аэрозольном ослаблении атмосферы дают только спектральные наблюдения. Таковые проводились в Антарктиде в обсерватории Мирный по немецкому спектрофотометру ABAS с набором интерференционных фильтров, охватывающих спектральную область 350–1040 нм. Определяемые при этом спектральные оптические толщины дают возможность оценить многолетнюю динамику уровней аэрозольного загрязнения в южной полярной области. Для примера на рис. 2б приведена межгодовая изменчивость среднегодовых значений аэрозольной оптической толщины (АОТ) атмосферы на длине волны 500 нм.

Этот показатель характеризует аэрозольное ослабление в том спектральном диапазоне, где аэрозоль является главным компонентом атмосферы, ослабляющим солнечную радиацию. Из рис. 2б хорошо видно, насколько велик отклик значений оптической толщины атмосферы на поступление в атмосферу продуктов крупных вулканических извержений, таких как Эль-Чичон (апрель 1982 г.) и особенно Пинатубо (июнь 1991 г.). Следует также отметить, что уровень аэрозольного ослабления за 2003–2006 гг. практически самый низкий за весь рассматриваемый период наблюдений, т.е. атмосфера в эти годы была очень чистой. В 2007 г. отмечено незначительное, по сравнению с предшествующими четырем годами, увеличение АОТ, что на данном этапе требует дальнейшего исследования.

Измеряемые в Антарктиде значения спектрального аэрозольного ослабления солнечной радиации являются одними из самых низких на Земле и, по существу, характеризуют естественный глобальный фон аэрозольного замутнения атмосферы. За весь период мониторинга их межгодовая изменчивость определялась лишь вулканической деятельностью за счет попадания продуктов мощных вулканических

ких извержений в стратосферу. В этих случаях аэрозольная оптическая толщина многократно возрастала в сравнении с фоновыми значениями. Прозрачность атмосферы, соответственно, существенно уменьшалась. Длительность периодов с повышенными уровнями замутнения атмосферы составляла 1,5–2 года.

Прозрачность арктической атмосферы существенным образом зависит от уровней антропогенных выбросов в атмосферу в умеренных широтах Северного полушария (см., например, [6]).

Известно, что арктическая дымка связана с образованием в зимне-весенний период в подинверсионном слое арктической атмосферы слоя с повышенной концентрацией аэрозолей, которые переносятся в Арктику от источников в умеренных широтах. Пространственный масштаб этого «аэрозольного облака» сопоставим с размерами Арктического региона.

После 1985 г. произошло существенное сокращение антропогенных выбросов в основном за счет сокращения промышленной активности в России. В частности, на 45 % сократился выброс серосодержащих газов, продуктом трансформации которых в значительной степени является антропогенный арктический аэрозоль.

На примере двух арктических станций – м. Желания и о. Врангеля, расположенных в западном и восточном секторах Арктики, – было показано, что в период полярной дымки средняя весенняя (март–май) оптическая толщина атмосферы (ОТА), которая связана с коэффициентом прозрачности  $P_2$  соотношением  $ОТА = -\ln P_2$  и также является косвенным показателем аэрозольного загрязнения атмосферы, уменьшилась за 1985–1995 гг. на 21 % на м. Желания и на 18 % на о. Врангеля.

За указанный период получены достаточно тесные корреляционные зависимости между ежегодными выбросами диоксида серы в России и средними весенними значениями оптической толщины атмосферы ОТА (рис. 3а). Коэффициенты корреляции составили 0,78 для м. Желания и 0,76 для о. Врангеля. Это дает право

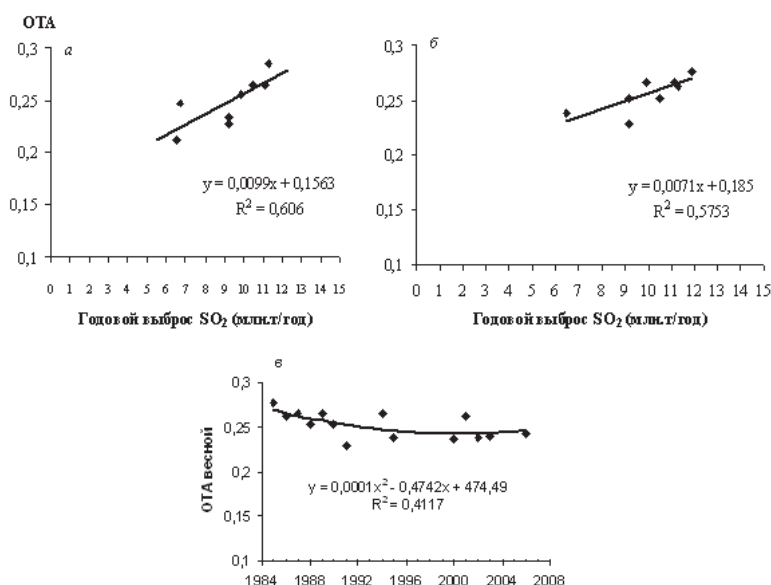


Рис. 3. Корреляционная зависимость между средними весенними значениями оптической толщины атмосферы (ОТА) на станциях м. Желания (а) и о. Врангеля (б) и количеством выбросов  $SO_2$  в России; в – изменчивость средних весенних оптических толщин атмосферы на о-ве Врангеля за 1985–2003 гг.

утверждать, что отрицательный тренд средних весенних значений ОТА был в значительной степени связан с уменьшением промышленной активности в России.

После 1993 г. на сети арктических метеорологических станций начались сбои в работе. В результате в настоящее время мы не располагаем данными актинометрических наблюдений на м. Желания. Имеются лишь данные, полученные после 2000 г. на станции о. Врангеля. На рис. 3в показана изменчивость средних весенних значений оптической толщины атмосферы на этой станции за 1985–2003 гг. Из него видно, что после 1995 г. средние весенние значения оптической толщины атмосферы на о. Врангеля начали увеличиваться, что хорошо показывает тренд ОТА, аппроксимированный полиномом 2-й степени. Такая тенденция значений ОТА, полученных в период существования арктической дымки, может быть связана с увеличением промышленных выбросов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Маршунова М.С. Условия формирования и характеристики радиационного режима Антарктиды. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 214 с.
2. Маршунова М.С. Радионов В.Ф. Колебания интегральной прозрачности атмосферы в полярных районах // Метеорология и гидрология. 1988. № 11. С. 71–80.
3. Научно-прикладной справочник по климату России (Арктический регион): Солнечная радиация. СПб.: Гидрометеиздат, 1997. 230 с.
4. Радионов В.Ф., Маршунова М.С., Русина Е.Н. и др. Аэрозольная мутность атмосферы в полярных областях // Изв. АН. Физика атмосферы и океана. 1994. Т. 30. № 6. С. 797–801.
5. Русин Н.П. Метеорологический и радиационный режим Антарктиды. Л.: Гидрометеиздат, 1961. 448 с.
6. Русина Е.Н., Радионов В.Ф. Оценка «доиндустриальной» оптической толщины атмосферы при полярной дымке в Арктике и современного вклада антропогенных выбросов // Метеорология и гидрология. 2002. № 5. С. 35–39.
7. Справочник по климату Антарктиды. Солнечная радиация. СПб.: Гидрометеиздат, 2002. 148 с.
8. Черниговский Н.Т., Маршунова М.С. Климат Советской Арктики (радиационный режим). Л.: Гидрометеиздат, 1957. 415 с.

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

#### PARTICULARITIES OF LONG-TERM VARIABILITY OF TOTAL SOLAR RADIATION AND ATMOSPHERIC TRANSPARENCY CHARACTERISTICS IN THE POLAR AREAS

*The results of the generalization and analysis of observation data about total radiation and total atmospheric transparency at the Russian Antarctic and Arctic stations and at the high-mountainous middle-latitude Shadzhatmaz station are presented. The atmospheric aerosol optical depth at Mirny station in Antarctica are also considered. The character of long-term, interannual and seasonal changes of these parameters is described.*

*The statistically significant trends of total radiation annual sums for more than 50 years observation period were not found out in the both polar areas. The values of spectral aerosol attenuation of solar radiation in Antarctic are the lowest on the Earth and, in essence, characterize "initial border" of the global background aerosol turbidity of the atmosphere. Powerful volcanic eruptions render the essential influence on the aerosol turbidity parameters in the both polar areas. The duration of the periods with increased levels of atmospheric turbidity after such eruptions averages from one and a half to some years.*

*Aerosol attenuation of solar radiation and total transparency of the Arctic atmosphere during the spring period are formed partly under influence of the anthropogenic emissions products transported from sources in moderate latitudes of Northern hemisphere. These parameters could be considered as indirect characteristics of anthropogenic loading intensity on the Arctic environment.*