

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

УДК 551.510.42:551.513

**В.Г. Аршинова, Б.Д. Белан, Е.В. Воронцова, Г.О. Задде, Т.М. Рассказчикова,
О.И. Семьянова, Т.К. Складнева, Г.Н. Толмачев**

АНАЛИЗ ПРИРОДЫ ДОЛГОВРЕМЕННОГО ТРЕНДА АЭРОЗОЛЯ В ТРОПОСФЕРЕ НАД ЗАПАДНОЙ СИБИРЬЮ

Анализируются причины обнаруженного ранее многолетнего тренда концентрации аэрозоля над территорией Западной Сибири. Рассматриваются два вида гипотез: поствулканическое действие и изменение параметров общей циркуляции атмосферы. Показано, что этот тренд обусловлен циркуляционными процессами: усилением западной зональной компоненты потока и изменением характера меридиональной циркуляции на территории региона.

1. Введение

Аэрозоль является одной из наиболее изменчивых компонент атмосферы, в значительной степени определяющей ее радиационный баланс. По сложившимся к настоящему времени понятиям в ряде регионов аэрозоль наряду с облачностью выполняет роль обратной связи, нивелирующей тепличный эффект от все возрастающей на планете концентрации парниковых газов [1]. Однако, по заключению международной группы, созданной по инициативе ООН, изученность глобального аэрозоля остается крайне низкой, не соответствующей его роли в атмосферных процессах. Поэтому исследование закономерностей пространственно-временной изменчивости этой компоненты воздуха над крупными регионами является актуальной задачей.

В настоящей статье рассматриваются и анализируются причины многолетней изменчивости концентрации аэрозоля, которая впервые выявлена в [2]. Длительное время уменьшение счетной концентрации аэрозоля в период с 1983 по 1987 г., зафиксированное в [2], нами не исследовалось, так как не находило подтверждения в других данных. Затем появились работы Г.М. Абакумовой и Е.В. Ярхо, которые выделили подобное же убывание аэрозольной толщи из актинометрических данных [3], и Д.Дж. Хофмана [4], обобщившего результаты измерений с помощью фотоэлектрических счетчиков, поднимаемых на шарах-зондах, и выявившего убывающий тренд счетной концентрации аэрозоля ($r \geq 0,25$ мкм) в период с 1982 по 1990 г. Эти результаты, с одной стороны, указали, что убывание аэрозоля в тропосфере над Западной Сибирью не является артефактом, а отражает ход глобальных процессов. С другой стороны, они потребовали объяснения причин такого поведения аэрозоля в атмосфере. Анализируя возможные причины на более обширном материале, в [5] нами были высказаны следующие три гипотезы:

1) в результате природоохранной деятельности снизилась концентрация антропогенного аэрозоля, что отразилось на его общей концентрации;

2) ввиду того, что полученный нами ряд начинается с 1983 г., выявленный тренд может быть долговременным следствием извержения вулкана Эль-Чичон (март–апрель 1982) – прямым или опосредованным;

3) полученные нами и другими авторами тренды аэрозольной компоненты являются отражением цикличности естественных атмосферных процессов, которые, как известно, имеют целый набор многолетних периодов.

Первая гипотеза проверялась в [6], где показано, что убыванием концентрации антропогенного аэрозоля можно объяснить не более 15% его величины, в то время как концентрация изменялась в несколько раз.

В настоящей статье приводятся результаты проверки второй и третьей гипотез.

2. Тренд концентрации аэрозоля как возможное поствулканическое следствие

Данные о том, что вулканические извержения могут влиять на погоду и климат, получены достаточно давно. Более 200 лет назад Б. Франклин связал похолодание на Земле с извержением вулканов в 1783 г. [7]. После этого был выполнен большой объем исследований, подтвердивших этот вывод. К настоящему времени имеется обширная литература по поствулканическим изменениям климатической системы. Соответствующие обзоры имеются в [7, 8]. Однако в этих работах, как правило, анализируются стратосферный аэрозоль либо радиационные и температурные последствия нахождения аэрозоля в стратосфере. О том, как изменяется концентрация тропосферного аэрозоля в поствулканическое время, сообщений не имеется. Анализируемый в этой статье ряд начат сразу же после извержения вулкана Эль-Чичон, который, как показано в [7–10], оказал существенное влияние на радиационные свойства атмосферы и температурный режим приземного слоя. Поэтому нельзя было пройти мимо этого факта.

Известно, что при взрывных извержениях, к каковым относится извержение Эль-Чичон, в атмосферу выбрасывается большое количество веществ в газообразном и аэрозольном виде, которые проникают и в стратосферу. При этом газы и аэрозоль, оставшиеся в тропосфере в течение нескольких недель, в крайнем случае месяцев, выводятся из воздуха. В стратосфере же газы конденсируются, образуя сернокислотный аэрозоль, который реагирует с имеющимися на этих высотах другими ингредиентами [11].

Многочисленные оценки, имеющиеся в [7, 8, 11], показывают, что основная масса аэрозоля находится в стратосфере от нескольких месяцев до 2 лет. Затем состарившиеся частицы аэрозоля оседают на подстилающую поверхность. Значит, в химическом составе аэрозоля, который фиксировался нами в ходе самолетных экспериментов одновременно с фоновым, в 1983 и 1984 гг. должны присутствовать вещества и элементы, характерные для поствулканического стратосферного аэрозоля [11, 12].

В одной из первых работ о стратосферном аэрозоле К. Юнге [12] показал, что основным элементом частиц является сера. В частицах в виде «следов» также присутствуют Al, Si, Ca. Более поздние исследования привели к выводу, что стратосферные частицы содержат около 76% серной кислоты [13], в которых имеется нерастворимое ядро, состоящее из компонентов, отличных от H_2SO_4 и H_2O [14]. Л.С. Ивлев, исследовавший большое количество вулканов, пришел к выводу [15], что при мощных вулканических извержениях характерно сильное обогащение умеренно летучих элементов Al, Se, Pb, Cd, Zn в мелких частицах и Si, Ca, Sc, Ti, Fe, Sn, To в более крупных. Эти элементы, по-видимому, и могут составлять нерастворимое ядро. Следовательно, если в анализируемый период над территорией Западной Сибири наблюдалось прямое поствулканическое воздействие вулкана Эль-Чичон, то должен быть и тренд вышеперечисленных веществ и элементов. Приблизительно такой же подход использовался К. Хаммером для оценки сернокислотного аэрозоля, оседающего на подстилающую поверхность [16].

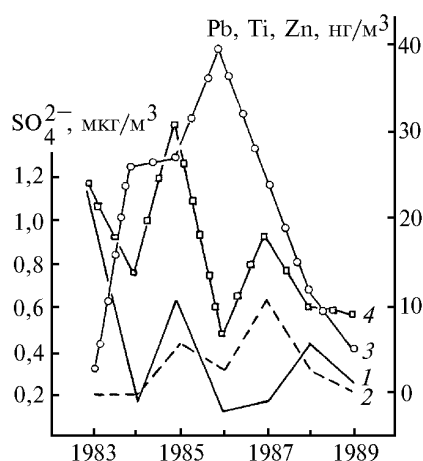


Рис. 1. Изменение концентрации отдельных компонент в среднегодовом химическом составе аэрозоля над Западной Сибирью: 1 – SO_4^{2-} , 2 – Zn, 3 – Ti, 4 – Pb

На рис. 1 представлен временной ход среднегодовых концентраций отдельных химических компонент, определявшихся нами в составе частиц и перечисленных Л.С. Ивлевым. Из рис. 1 видно, что ионы SO_4^{2-} действительно присутствовали в большом количестве в составе тропосферного аэрозоля в 1983 г., т.е. на следующий год после извержения вулкана Эль-Чичон. Однако то, что они имели вулканическое или стратосферное происхождение, не подтверждается временным ходом других элементов. В частности, это Zn, Ti и отчасти Pb, имеющие иную динамику в данный период. Скорее всего, здесь имеется временное совпадение, а рост концентрации ионов SO_4^{2-} в 1983 г. имеет иную природу.

Факторы обогащения некоторых химических компонент аэрозоля по отношению к Si над Западной Сибирью

Год	1983	1984	1985	1986	1987	1988
Ti	0,14	1,71	1,22	2,75	0,54	0,54
Pb	400,00	23,30	516,70	116,70	300,00	16,70
Sn	2,11	1,41	0,00	1,41	4,93	6,00
Cu	24,32	78,37	454,10	1040,50	316,20	213,51
Cr	н/о	0,002	1,59	0,23	0,22	0,47
Ca	н/о	0,51	1,39	0,25	1,08	0,37

Примечание. н/о – не определялся.

Другим критерием, указывающим на происхождение аэрозольных частиц, является фактор обогащения, который для вулканогенных элементов составляет 100–10000 раз [17, 18].

Из данных таблицы видно, что над территорией Западной Сибири в составе аэрозоля за анализируемый период таким величинам фактора обогащения соответствуют Pb и Cu. Однако их временная динамика также противоречит гипотезе прямого поствулканического действия.

Таким образом, с высокой степенью уверенности гипотезу прямого поствулканического действия как причину убывания концентрации аэрозоля в тропосфере над Западной Сибирью можно отклонить.

В связи с тем что время жизни вулканического аэрозоля в стратосфере – не единственный параметр, определяющий воздействие вулканов на климат, в ряде работ анализируется возможное пролонгированное или опосредованное поствулканическое влияние.

Так, в [19] численным методом показано, что поствулканическое действие аэрозоля может отражаться в оптической аэрозольной толще свыше 4 лет. Период, в течение которого в среднем для всех сезонов и широтных зон будут обнаруживаться последствия извержения, определен Л.П. Спириной [20] в 5–7 лет. Анализ результатов лидарного зондирования привел В.В. Зуева к выводу, что последствия извержения вулкана Пинатубо обнаруживались в стратосфере над Томском через 5 лет после события [21]. Следовательно, имеются предпосылки говорить о более длительном воздействии вулканов на климат, чем 1–2 года после их извержения.

М.И. Будыко, проанализировав возможные варианты поствулканического развития процессов, пришел к выводу [22], что они должны проявляться опосредованно. Поскольку во многих работах, посвященных исследованию изменения температуры после извержения вулканов, указывается на то, что она в среднем понижается на 0,2–0,5 °C в первые 1–2 года, причем неодинаково в разных физико-географических регионах, то это должно приводить к нарушению циркуляции воздуха на планете, а соответственно, сопровождаться климатическими отклонениями. Поэтому опосредованное поствулканическое действие следует оценивать по изменению режима циркуляции. Поскольку это совпадает с нашей гипотезой, сформулированной как отражение естественных атмосферных процессов, то проверка обеих гипотез (опосредованного действия вулканов и циркуляционных механизмов) будет вестись ниже параллельно.

3. Связь динамики атмосферных процессов и изменения концентрации аэрозоля

Еще в 1948 г. С.П. Хромов отметил связь смены воздушных масс с мутностью всей толщи атмосферы [23]. За истекший период появилось много работ, в которых показано, что каждая воздушная масса несет в себе определенную концентрацию аэрозоля. Поэтому вначале рассмотрим вопрос о повторяемости основных типов воздушных масс, наблюдавшихся над территорией Западной Сибири в период самолетных экспериментов (рис. 2).

Из рис. 2 видно, что обнаруженный нами тренд на участке 1984–1990 гг. обусловлен уменьшением повторяемости арктических воздушных масс и увеличением повторяемости умеренных. Число измерений в 1983 и 1991 гг. было невелико, поэтому возможно, что отклонение от общей тенденции в эти периоды произошло из-за недостаточной статистической обеспеченности. Частота появления субтропических масс на территории Западной Сибири в период экспериментов была невысокой, имела случайный характер и, очевидно, не вносила заметного вклада в тренд аэрозоля.

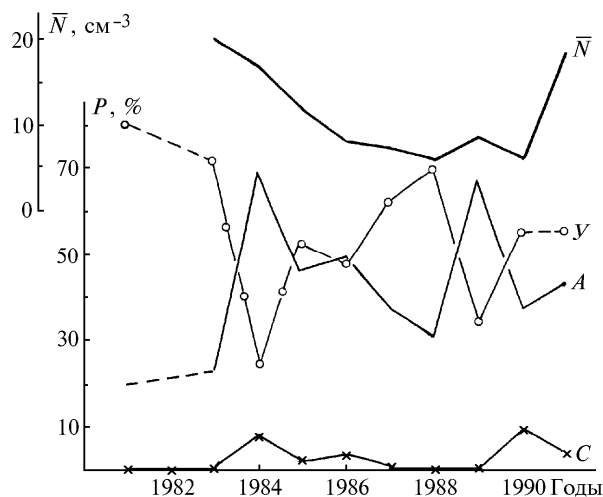


Рис. 2. Многолетний ход счетной концентрации аэрозоля (\bar{N}) и повторяемость воздушных масс: *A* – арктической, *C* – субтропической, *U* – умеренной в период самолетных экспериментов над Западной Сибирью

Такой результат несколько противоречит устоявшемуся мнению, что арктические воздушные массы наиболее чистые. В детальном же исследовании, выполненном для территории Западной Сибири, показано [24], что наполненность аэрозолем воздушных масс зависит от сезона, высотного диапазона, средней температуры слоя и пути, по которому конкретная воздушная масса пришла на территорию Сибири. Следовательно, необходимо проанализировать характер общей циркуляции атмосферы в рассматриваемый период.

Прежде чем приступить к такому анализу и в связи с тем, что самолетные измерения не имели регулярного характера, целесообразно проверить, насколько повторяемость воздушных масс, в которых проводились эксперименты, соответствует повторяемости воздушных масс, зафиксированных в течение каждого года службой погоды для данной территории на основании регулярных данных.

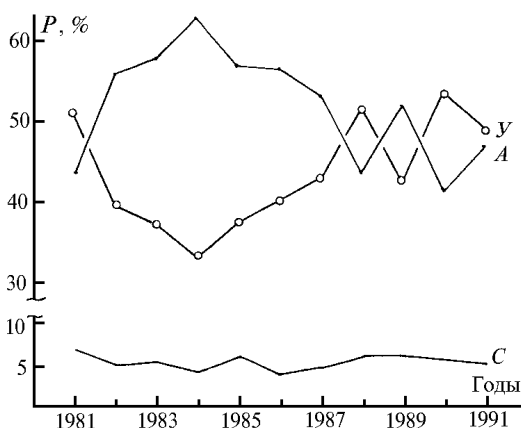


Рис. 3. Повторяемость воздушных масс по сетевым данным над территорией Западной Сибири: *A* – арктическая, *C* – субтропическая, *U* – умеренная

Из рис. 3 видно, что изменчивость повторяемости воздушных масс на территории Западной Сибири в период с 1981 по 1991 г. носила характер, подобный зафиксированному в самолетных экспериментах (см. рис. 2). Это, в первую очередь, относится к убыванию повторяемости арктических воздушных масс и увеличению числа умеренных. Для субтропических масс многолетний ход близок к нейтральному.

Сопоставление рис. 2 и 3 свидетельствует о том, что эксперименты проводились в условиях, близких к средним для данной территории, и что тренд концентрации аэрозоля связан с изменением повторяемости умеренных и арктических масс от года к году.

Перейдем к анализу форм циркуляции в 80-х годах. Такой анализ обычно проводится с помощью различных индексов циркуляции [25]. На рис. 4 приведены рассчитанные для этого периода индексы циркуляции Вангенгейма [26], Каца [27] и Е.Н. Блиновой [28].

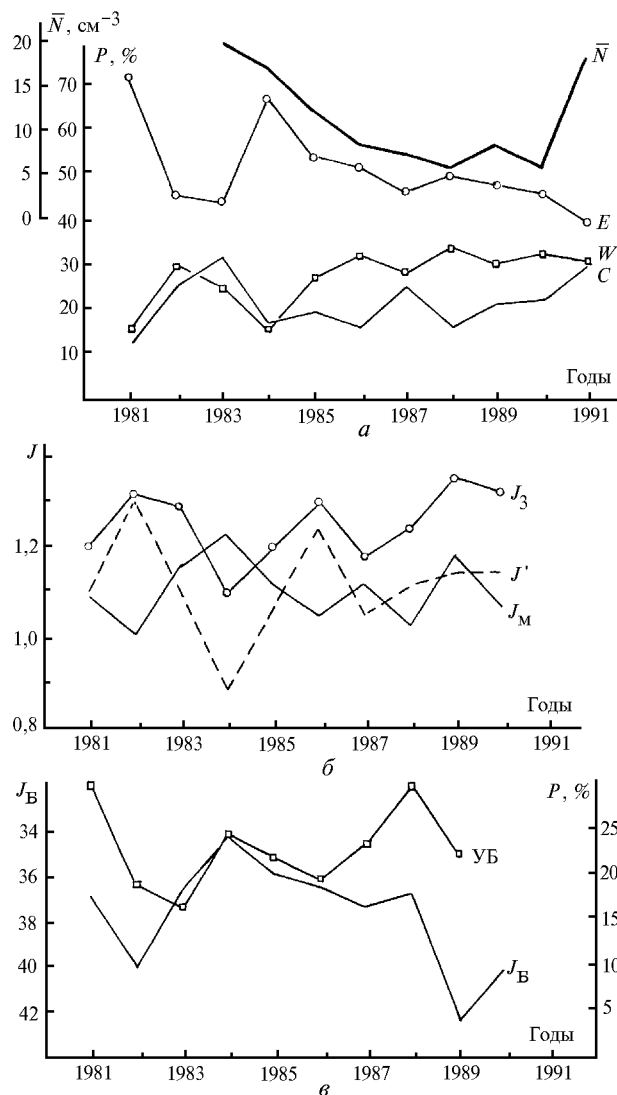


Рис. 4. Временной ход индексов циркуляции: *a* – многолетний ход счетной концентрации аэрозоля (\bar{N}) и повторяемость западной (W), восточной (E) и меридиональной (C) форм циркуляции; *б* – индексы циркуляции Каца: J_3 – зональной; J_m – меридиональной; J' – их соотношение; *в* – индекс циркуляции Блиновой (J_b) и повторяемость появления уральского блока (UB) над территорией Западной Сибири

Из рис. 4, *a* видно, что уменьшение счетной концентрации аэрозоля над территорией Западной Сибири в период с 1984 по 1990 г. сопровождалось уменьшением над этой территорией количества восточных форм циркуляции и небольшим ростом западной и меридиональных

форм. Данные за 1983 и 1991 гг. отклоняются от этой тенденции. По-видимому, здесь также сказывается недостаточная статистика.

Подобный же вывод можно сделать, обратившись к индексам циркуляции Каца, приведенным на рис. 4, б. Видно, что падение концентрации аэрозоля происходило на фоне общего роста интенсивности зональной формы циркуляции при относительно небольших вариациях интенсивности меридиональной.

Сопоставление данных на рис. 4, а и б говорит о том, что тренд концентрации аэрозоля в середине 80-х годов был обусловлен циркуляционными процессами, а именно увеличением повторяемости и интенсивности зональной западной циркуляции при повышении повторяемости меридиональной циркуляции без существенного изменения ее интенсивности.

Этот вывод подтверждается и ростом индекса циркуляции Блиновой (рис. 4, в), который представляет собой отношение линейной скорости движения воздуха вдоль круга широты к расстоянию до оси вращения Земли. Из рис. 4, в следует (ордината обратная), что индекс с 1984 по 1989 г. вырос с 34 до 42, т.е. интенсивность зональной циркуляции в этот период также возрастала.

Чтобы оценить роль меридиональных процессов, воспользуемся сведениями о повторяемости так называемого «уральского блока», которые были любезно предоставлены доцентом Томского госуниверситета А.И. Кусковым и приведены на рис. 4, в. Важная роль этого процесса для территории Западной Сибири выявлена Л.И. Бордовской [29]. Дело в том, что при усилении интенсивности западного зонального потока над Уральскими горами увеличивается вероятность образования высотного гребня давления, который выполняет блокирующую роль. В этом случае на территорию Западной Сибири начинают поступать воздушные массы с Северного ледовитого океана по ультраполярным траекториям.

Из рис. 4, в следует, что на фоне усиления интенсивности западной зональной циркуляции одновременно имело место повышение повторяемости блокирующих процессов над Уралом, с 16% в 1983 г. до 30% в 1988 г. Отсюда следует, что тренд аэрозоля был обусловлен сложением двух процессов: повышением повторяемости умеренных воздушных масс, поступающих с Атлантического океана по зональным траекториям, и изменением траектории арктических масс, которые попадали на территорию Западной Сибири не через Европейскую территорию России, а по ультраполярным (меридиональным) траекториям с Карского моря. Поэтому арктические массы были более чистыми.

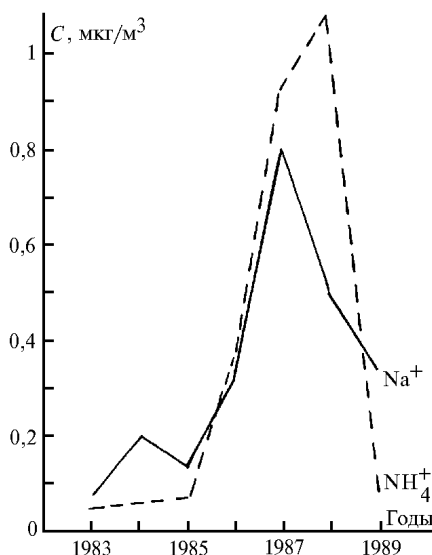


Рис. 5. Среднегодовая концентрация ионов Na^+ и NH_4^+ в составе аэрозоля над Западной Сибирью

Такой вывод основывается не только на анализе индексов циркуляции. Если обратиться к рис. 5, то увидим, что за рассматриваемый период в составе аэрозоля значительно возросло содержание NH_4^+ и Na^+ , которые однозначно относятся к морскому аэрозолю. Причем из роста этих компонентов можно с полной уверенностью исключить антропогенный фактор [30].

4. Обсуждение возможных причин изменения циркуляции

Приведенные выше данные свидетельствуют о том, что изменение концентрации аэрозоля над Западной Сибирью в 80-х годах было обусловлено циркуляционными процессами. Однако эти данные не позволяют ответить на вопрос о причине изменения самой циркуляции: было ли оно следствием поствулканических процессов или это естественный процесс смены циркуляционных эпох. Дело в том, что почти одновременно с извержением вулкана Эль-Чичон возникло и необыкновенно интенсивное явление «Эль-Ниньо/Южное колебание» [31–33], которое по величине воздействия на общую циркуляцию атмосферы соизмеримо с вулканическими. По-видимому, не случайно, что после извержения вулкана Эль-Чичон учеными вместо ожидаемого похолодания наблюдалось повышение температуры во многих районах земного шара [8, 10, 34]. Поэтому выделить вулканический сигнал, как справедливо замечает К.Я. Кондратьев [8], вряд ли в таких условиях возможно. В пользу этого замечания говорят и результаты работы [35], в которой смена форм циркуляции связывается с североатлантическим и южным колебаниями и для таких связей получены значимые коэффициенты корреляции.

5. Заключение

На основании анализа многолетнего хода счетной концентрации аэрозоля, его химического состава, режима циркуляции атмосферы можно прийти к выводу, что обнаруженный тренд концентрации над территорией Западной Сибири в 80-х годах обусловлен в основном циркуляционными процессами и, в частности, усилением интенсивности и повторяемости зональной западной компоненты и изменением характера меридиональной компоненты.

Работа выполнена при поддержке грантов инициативных проектов Отделения диагностики окружающей среды ИОА СО РАН на 1996 г. и гранта РФФИ 96-05-64322.

1. Climate change/ Ed. D. Stannes and Ph. Bourdeau. Copenhagen, 1995. P. 513–522.
2. Белан Б. Д. // Тезисы докладов X Всесоюзного симпозиума по распространению лазерного излучения в атмосфере. Томск, 1989. С. 77.
3. Абакумова Г. М., Ярхо Е. В. // Метеорология и гидрология. 1992. N 11. С. 107–113.
4. Hofmann D. J. // J. Geophys. Res. 1993. V. 98. D 7. P. 12753–12766.
5. Belan B. D., Panchenko M. V., Pol'kin V. V. // Fourth International Aerosol Conference. Los Angeles, 1994. V. 2. P. 871–872.
6. Белан Б. Д., Толмачев Г. Н. Оптика атмосферы и океана. 1996. Т. 9. N 1. С. 99–105.
7. Асатуров С. Л., Будыко М. И., Винников К. Я. и др. Вулканы, стратосферный аэрозоль и климат Земли. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 256 с.
8. Кондратьев К. Я. Глобальный климат. М.: ВИНТИ, 1987. Сер. Метеорология и гидрология. Т. 17. 316 с.
9. Robock A., Mao J. // Geophys. Res. Lett. 1992. V. 19. N 24. P. 2405–2408.
10. Логинов В. Ф. Вулканические извержения и климат. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 64 с.
11. Кондратьев К. Я., ред. Аэрозоль и климат. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 544 с.
12. Junge C. E., Manson J. E. // J. Geophys. Res. 1961. V. 60. N 10. P. 2163–2182.
13. Gras J. L., Laby J. // J. Geophys. Res. 1979. V. 84. N 2. P. 303–307.
14. Rosen J. M., Hofmann D. J. // Geophys. Res. Lett. 1982. V. 7. P. 669–672.
15. Ивлев Л. С. // Оптика атмосферы и океана. 1996. Т. 9. N 8. С. 1039–1057.
16. Hammer C. U. // Nature. 1977. V. 270. P. 482–486.
17. Buat-Menard P., Arnold M. // Geophys. Res. Lett. 1978. V. 5. N 4. P. 245–248.
18. Sedlacek W. A., Heiken G., Zoller W. H. // Science. 1982. V. 126. N 4550. P. 119–121.
19. Асатуров М. Л. // Метеорология и гидрология. 1984. N 11. С. 59–66.
20. Спирина Л. П. // Труды ГГО. 1975. Вып. 330. С. 126–130.
21. Зуев В. В. // Оптика атмосферы и океана. 1996. Т. 9. N 9. С. 1171–1183.
22. Будыко М. И. Современное изменение климата. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 47 с.
23. Хромов С. П. Основы синоптической метеорологии. Л.: Гидрометеиздат, 1948. 700 с.
24. Панченко М. В., Терпугова С. А. // Оптика атмосферы и океана. 1995. Т. 8. N 12. С. 1761–1766.
25. Багров Н. А., Кондратович К. В., Пудь Д. А., Угрюмов А. И. Долгосрочные экологические прогнозы. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 248 с.
26. Вангенгейм Г. Я. // Труды ААНИИ. 1952. Т. 34. 314 с.
27. Кац А. Л. Сезонные изменения общей циркуляции атмосферы и долгосрочные прогнозы погоды. Л.: Гидрометеиздат, 1960. 270 с.
28. Блинова Е. Н. // Метеорология и гидрология. 1972. N 10. С. 23–32.
29. Бордовская Л. И. // Материалы научной конференции «Проблемы гляциологии Алтая». Томск: Изд-во ТГУ, 1974. С. 95–117.
30. Lee D. S., Atkins D. H. F. // Geophys. Res. Lett. 1994. V. 21. N. 4. P. 281–284.
31. Belle T. L., Abdullah A. // Third Conf. on Climate Variat. and Symp. on Contemp. Climate: 1850–2100. Los Angeles, 1985. P. 89–90.

32. Клименко В. В. // Энергия. 1994. N 2. С. 11–17.
33. Ясманов Н. А. // Жизнь Земли: Природа и общество. М.: МГУ, 1993. С. 31–42.
34. Angell J. K., Kozshover J. // Mont/Weather Rev. 1984. V. 12. N 7. P. 1457–1463.
35. Разоренова О. А., Зверьяев И. И. // Метеорология и гидрология. 1996. N 6. С. 73–81.

Институт оптики атмосферы СО РАН, Томск
Томский госуниверситет

Поступила в редакцию
30 декабря 1996 г.

V. G. Arshinova, B. D. Belan, E. V. Vorontsova, G. O. Zадde,
T. M. Rasskazchikova, O. I. Semjanova, T. K. Sklyadneva, G. N. Tolmachev. **Analysis of
Aerosol Long-term Trend in Troposphere Over West Siberia.**

The causes are analyzed of many-year trend of aerosol concentration over West Siberia territory, which was discovered earlier. Two hypotheses are treated: postvolcanic action and change of parameters of the atmosphere general circulation. The trend is shown to be due to circulation processes, i.e. amplification of west zone component of the flow and variation of meridional circulation character over the region.