

С.Д. Андреев, Л.С. Ивлев

ВРЕМЕННАЯ И ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПОЛЕЙ ОПТИЧЕСКИХ И АЭРОЗОЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК В АТМОСФЕРЕ. ЧАСТЬ I. ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АТМОСФЕРЫ

Рассматриваются результаты применения метода нормированного размаха для анализа временных рядов наблюдений оптической толщины атмосферы и ее аэрозольной составляющей в видимой и ближней инфракрасной областях спектра. Показано, что значения показателя Херста существенно отличны от $H = 0,5$, что свидетельствует об отличии процесса формирования радиационного режима атмосферы от случайного. Обнаруженное совпадение значений H для оптической толщины атмосферы и ее аэрозольной компоненты подтверждает определяющую роль аэрозолей в этом процессе и свидетельствует, что вариации анализируемых величин определяются одними и теми же механизмами. Обнаруживается принципиальное различие внутрисуточных изменений аэрозольной составляющей оптической толщины атмосферы при повышенной вулканической активности и при нормальных условиях.

В последние годы при анализе временных рядов широкое распространение получил так называемый метод нормированного размаха. С помощью этого метода анализировались результаты наблюдений таких разнообразных величин, как показатели активности Солнца (например, числа Вольфа), высота морских волн, толщина годовых колец деревьев, толщина донных отложений, многолетние временные вариации речных стоков и некоторых метеопараметров (среднесуточная температура и температура в фиксированные моменты времени, влажность воздуха, скорость и направление ветра и др.) [1, 2]. Одна из основных причин, обуславливающих столь пристальное внимание, проявляемое к получаемым на основе метода нормированного размаха результатам, связана с перспективами разработки новых, относительно простых и надежных прогностических схем.

Именно это обстоятельство побудило нас провести соответствующую обработку нескольких имеющихся в нашем распоряжении выборок результатов оптических и аэрозольных наблюдений. Следует отметить, что ранее подобный анализ не проводился. Как представляется, это связано, главным образом, с ограниченностью массивов подобных данных и их сравнительно малой доступностью. Обсуждаемые ниже закономерности, безусловно, имеют в значительной степени предварительный характер и нуждаются в дальнейшей тщательной проверке и подтверждении, однако их обнаружение даже в некоторых частных случаях, исследованных нами, представляет несомненный интерес.

Случайная величина $x(t)$ по наблюдениям в течение периода t характеризуется средним за время наблюдения значением

$$\xi(t) = \frac{1}{t} \sum_i x(\tau_i) \quad (1)$$

и среднеквадратическим отклонением

$$S(t) = \left\{ \frac{1}{t} \sum_i [x(\tau_i)^2 - \xi(t)^2] \right\}^{1/2}, \quad (2)$$

где τ_i – сроки наблюдений.

Если определить размах величины $x(t)$ за период t как

$$R(t) = \max x(t) - \min x(t), \quad (3)$$

то имеет место соотношение

$$R(t)/S(t) \sim t^H. \quad (4)$$

Величина $R(t)/S(t)$ получила название нормированного размаха.

Не представляет особой сложности показать [3], что для случайного процесса с независимыми значениями $x(t)$ и конечной дисперсией $H = 0,5$.

Однако еще в 50–60 гг. был установлен эмпирический закон Херста [1], который анализировал временную зависимость нормированного размаха и показал, что для многих природных процессов $H = 0,72 \pm 0,08$.

В связи с этим соотношение (4) получило наименование закона Херста, а показатель H – постоянной Херста. (В оригинальной работе [1] используются обозначения K и H , современное наименование постоянной ввел Мандельброт [4]).

Значения показателя Херста H для некоторых природных процессов [1]

Гидрометеорологические характеристики		Период наблюдений (годы)	Количество		Среднее	Дисперсия
			пунктов	циклов		
Водосток	Сток рек	10–100	39	94	0,72	0,091
	р. Рона	1080	1	66	0,77	0,055
Уровень рек и озер		44–176	4	13	0,71	0,082
Уровень осадков		24–214	39	173	0,70	0,088
Донные отложения	оз. Саки	50–2000	1	114	0,69	0,064
	оз. Мозм и Тимискаминг	50–1200	2	90	0,77	0,094
	оз. Коринти и Хейли	50–650	2	54	0,77	0,098
Метеоданные	Температура	29–60	18	120	0,68	0,087
	Давление	29–96	8	28	0,63	0,070
	Число солнечных пятен	38–190	1	15	0,75	0,056
	Толщина годовых колец деревьев	50–900	5	105	0,79	0,076
Средние по разделам	Водообмен		83	346	0,72	0,08
	Донные отложения		5	258	0,74	0,09
	Метеоданные		32	268	0,72	0,08
Общее среднее		10–2000	120	872	0,726	0,082

Вывод, сделанный Херстом, подтверждается многочисленными дальнейшими исследованиями [2]. Сводка некоторых результатов, полученных при анализе рядов наблюдений метеорологических и гидрологических характеристик, представлена в таблице. Во всех случаях получены значения H , существенно отличающиеся от 0,5 (для простейшей модели случайного процесса – бросание монеты – уверенно получается $H = 0,5$).

Вопрос о причине этого различия стоял еще перед Херстом, и он выдвинул предположение, что сдвиг значений H происходит в связи с существованием для природных процессов многочисленных взаимосвязей и эффекта своего рода «памяти». Так, речной сток, анализом закономерностей которого он преимущественно занимался, определяется не только наличным запасом воды в период проведения наблюдений, но и синоптическими условиями региона, состоянием грунтовых вод во всем бассейне реки за достаточно длительный предшествующий период и т.д. [1].

Примечательно, что в модельных экспериментах, учитывающих предысторию процесса (можно отметить, что первоначальная простейшая версия такого рода модельного эксперимента – «числовые карты» – была разработана и реализована еще самим Херстом), при получении достаточно длительного временного ряда наблюдается тенденция $H \rightarrow 0,5$, но для природных процессов это в большинстве случаев не обнаруживается [1, 2]. Следует отметить, что при численном моделировании случайных процессов асимптотическое стремление к $H = 0,5$ обычно наблюдается для очень длительных рядов ($N \approx 10^5 \div 10^6$); сколько-нибудь строго оценить достоверность значений H , полученных по ограниченным выборкам результатов измерений, не представляется возможным. Именно в связи с этим закон Херста, устанавливающий для природных процессов отличие H от 0,5, воспринимается как эмпирический. Истинная причина получения смещенных оценок H при изучении природных процессов не выяснена до настоящего времени. Предполагается, что справедливо первоначальное объяснение [1].

Этот факт – отличие H от 0,5, обнаруживающееся для природных процессов, – некоторые исследователи объясняют их фрактальной природой; иногда даже делается вывод, что фрактальная структура является всеобщим свойством природных процессов и именно в этом заключается их основное отличие от процессов антропогенных, которые характеризуются строгими (геометрическими) соотношениями или же являются случайными.

Представляется, что такой вывод, имеющий преимущественно общезначимое и общеприкладное значение, нуждается в более глубоком, чем в настоящее время, обосновании и теоретическом объяснении. Однако сам факт установления определенных закономерностей временных вариаций разнообразных природных процессов даже в случаях, когда их природа остается неясной, безусловно, представляет интерес, и не в последнюю очередь, как это отмечено выше, в связи с разработкой новых прогностических схем развития процессов в окружающей среде и даже в общественных отношениях.

Строгое теоретическое обоснование такой возможности (как и истинной природы явления) отсутствует; скорее, здесь действует аналогия с изученным Мандельбротом процессом обобщенного броуновского движения. Введя в [4] понятие обобщенного броуновского движения, он показал, что положение частицы при нем описывается как фрактальная структура с размерностью $D = 2 - H$. В ставших уже классическими работах [4,5] сформулированы условия образования фрактальных систем и способы их описания.

Для классического броуновского движения ($H = 0,5$) корреляция прошлых (при $t < 0$) и будущих ($t > 0$) приращений координат отсутствует, в то время как для обобщенного броуновского движения функция корреляции будущих приращений $B_H(t)$ с прошлыми $B_H(-t)$ имеет конечное, отличное от нуля, значение:

$$C(t) = \langle -B_H(-t) B_H(t) \rangle / \langle B_H^2(t) \rangle = 2^{2H-1} - 1. \quad (5)$$

В случае $H \neq 1/2$ оказывается $C(t) \neq 0$ при любых значениях t .

При $H > 1/2$ поддерживается наблюдающаяся тенденция: если в течение некоторого времени в прошлом наблюдались положительные приращения измеряемой величины, то и впредь, по крайней мере на протяжении периода, сравнимого с периодом наблюдений, в среднем будет происходить ее возрастание. И наоборот, наблюдавшаяся в прошлом тенденция к уменьшению означает в этом случае продолжение в среднем уменьшения в будущем. Это свойство сохранения тенденции развития процесса называют свойством персистентности.

Случай с $H < 1/2$ характеризуется антиперсистентностью: рост величины в прошлом означает ее уменьшение в будущем, а тенденция к уменьшению в прошлом делает вероятным ее увеличение в будущем.

Поведение временного ряда, описываемое формулой (5), противоречит строго доказываемым или обычно допускаемым в силу их практической очевидности свойствам статистических рядов и физических систем. Как правило, предполагается статистическая независимость членов ряда на больших интервалах времени и (или) пространства, что является существенной составной частью представлений о тепловом равновесии.

Использование свойства персистентности (антиперсистентности) предоставляет возможность сравнительно простого и надежного прогноза дальнейшего развития наблюдаемого процесса на основе данных об его истории, что, как отмечено выше, в значительной степени объясняет повышенное внимание к подобным исследованиям в последние годы.

Как отмечено выше, при анализе разнообразных природных процессов объемы выборок, как правило, крайне ограничены, что затрудняет оценку достоверности определяемых значений показателя Херста H . Положение усугубляется тем обстоятельством, что, например, гидрометеорологические характеристики подвержены значительным сезонным и суточным колебаниям. Это приводит к существенному увеличению разброса точек на графике зависимости нормированного размаха от времени и обнаружению квазипериодических вариаций, что существенно искажает искомую зависимость. Если физическая природа изучаемого процесса и его закономерности хорошо изучены, возможно введение соответствующих поправок, но в большинстве случаев подобная процедура может существенно повлиять на результаты анализа.

Так, одним из основных объектов, рассматриваемых нами, являются результаты измерений оптической толщины атмосферы. В связи с изменением высоты Солнца в течение светового дня она закономерно изменяется, и один из возможных путей решения проблемы – приведение всех анализируемых данных к одной высоте Солнца (при публикации результатов подобных измерений обычно приводятся значения оптической толщины для вертикального столба атмосферы). Но одновременно с изменением атмосферной массы могут изменяться стратификация атмосферы, концентрации некоторых ослабляющих излучение газов и аэрозолей и т. д. Вряд ли возможно предложить универсальный метод учета этих изменений состояния атмосферы, попытки какой-либо коррекции результатов измерений могут привести к не-

прогнозируемым последствиям. Поэтому при анализе результатов измерений прозрачности атмосферы мы использовали данные, полученные в околополуденные часы при мало изменяющейся и практически одинаковой воздушной массе.

Другая сложность при интерпретации получаемых в результате подобного анализа данных связана с тем обстоятельством, что, как показывает практика, во многих случаях при разных масштабах времени обнаруживаются существенно различные значения постоянной Херста. Как отмечено выше, не представляется возможным строго оценить достоверность значений H , получаемых при малых объемах выборок, и возможно, что в некоторых случаях данный эффект связан именно с недостаточностью объема данных. Однако часто оказывается, что обнаруживаемые изменения характера зависимости связаны с объективными различиями природы изучаемого процесса на различных интервалах времени.

Измерения оптических характеристик атмосферы (как спектральные, так и интегральные) – прозрачности атмосферы, оптической толщины и ее составляющих – находятся в центре внимания атмосферной оптики и актинометрии и получили широкое распространение. Наиболее массовый характер имеют актинометрические (интегральные) измерения, существуют также значительные массивы результатов спектральных измерений, особенно в коротковолновой области спектра.

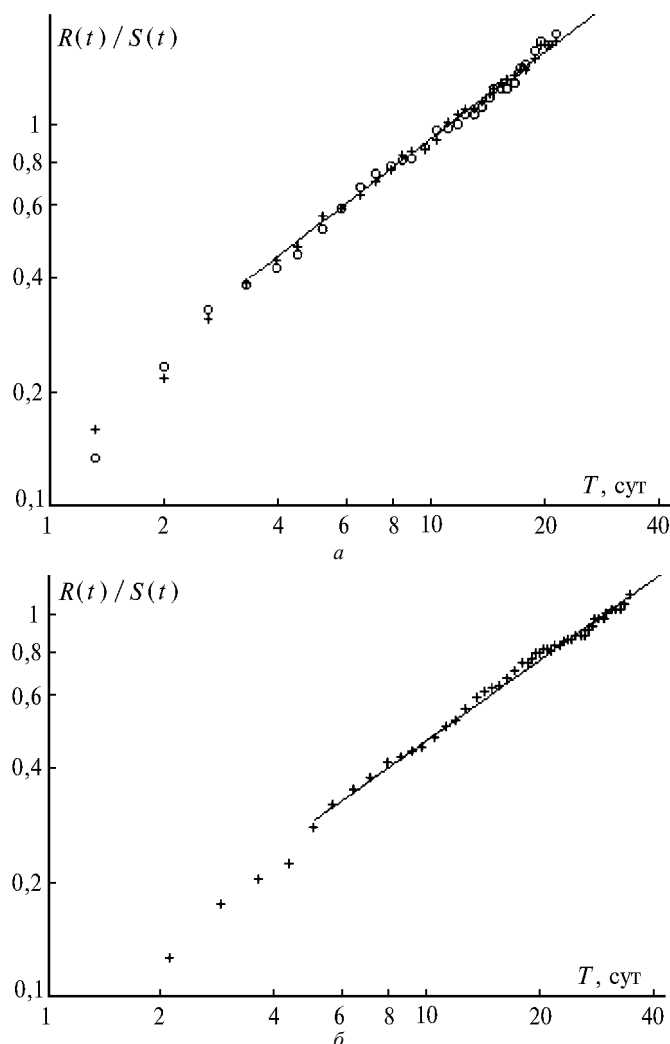


Рис. 1. Зависимость от времени нормированного размаха коэффициентов общего атмосферного (кружки) и аэрозольного (крестики) ослабления. Экспериментальные данные: a – [6, 7], $б$ – [8]

На рис. 1, a приведены результаты обработки методом нормированного размаха части массива экспериментальных данных [6, 7] о спектральных значениях оптической толщины ат-

мосферы и определенных на основе этих данных коэффициентов атмосферного и аэрозольного ослабления.

Измерения [6, 7] относятся ко всей толще атмосферы и охватывают спектральный диапазон от 2 до 15 мкм; приводимые здесь данные относятся к длине волны $\lambda = 2,2$ мкм. Интересно отметить, что значения нормированного размаха коэффициентов аэрозольного и атмосферного ослабления укладываются на одну кривую. Представляется, что этот факт можно рассматривать как еще одно подтверждение значимости аэрозольного ослабления в процессе формирования оптических свойств атмосферы. Полученное при анализе значение $H = 0,78 \pm 0,04$ свидетельствует, что найденные при измерениях величины общего атмосферного $\alpha_{ext}(t)$ и аэрозольного $\alpha_{aer}(t)$ ослабления являются взаимозависимыми. Представляется, что такой вывод нельзя считать совершенно неожиданным, поскольку значения этих коэффициентов в условиях реальной атмосферы не могут изменяться мгновенно, «помнят» предысторию за некий предшествующий период. На основе данных рис. 1, а можно предположить, что этот период может составлять от часов до нескольких суток.

На рис. 1, б приведены результаты соответствующей обработки небольшой части массива экспериментальных данных [8], имеющейся в нашем распоряжении. Разделение компонент ослабления проводилось по методике, описанной в [9] (разумеется, желательно было бы проверить, насколько справедлива зависимость, иллюстрируемая кривыми рис. 1, б, для коэффициентов аэрозольного ослабления, определяемых при использовании методики разделения компонент ослабления [8]). Можно отметить, что при анализе данных, послуживших основой для построения зависимости рис. 1, выявляются признаки присутствия в рассматриваемом временном ряду определенной цикличности с периодами от нескольких часов до 3–5 суток. Объем анализируемых данных слишком ограничен, чтобы говорить об уверенном обнаружении подобной периодичности (в связи с этим соответствующие данные здесь подробно не рассматриваются), но сам факт выявления такого рода вариаций удивления вызывать не может – подобные эффекты неоднократно наблюдались при микрофизических и оптических измерениях [10] и обычно интерпретируются как проявления различий свойств воздушных масс, сменяющихся в результате воздействия синоптических процессов.

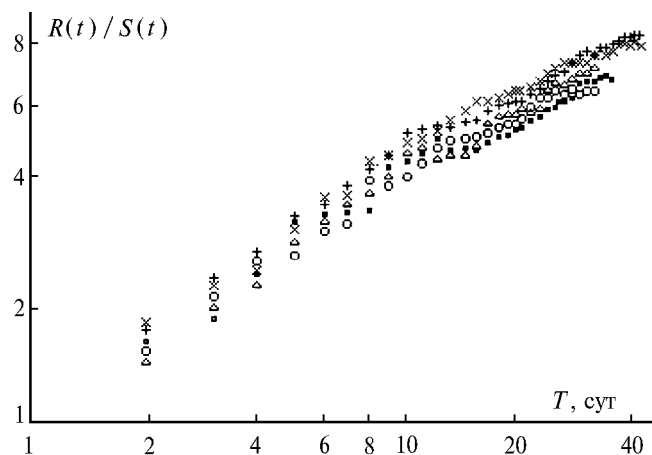


Рис. 2. Временная зависимость нормированного размаха. Экспериментальные данные Смитсоновского института [11] (пиргелиометрические измерения спектральной прозрачности толщи атмосферы). Различные значки соответствуют отдельным годам наблюдений

На рис. 2 приведены результаты аналогичной обработки экспериментальных данных по пиргелиометрическим измерениям спектрального пропускания толщи атмосферы [11] (как и в предыдущем случае, здесь приведены данные для $\lambda = 2,2$ мкм). В этом случае показатель Херста также существенно отличен от значения $H = 0,5$, характерного для случайного процесса.

Выборки, использованные при получении результатов, иллюстрируемых графиками рис. 1, 2, ограничены – во всех случаях их объем не превышает нескольких десятков (30–50) точек. При подобном объеме выборок трудно объективно оценить достоверность полученных значений показателя Херста. С целью получения более значимых оценок аналогичным образом были обработаны результаты актинометрических измерений, проводившихся на протяжении мая – июня 1995 г. в районе г. Колима (Мексика) при участии одного из авторов.

Измерения прямой солнечной радиации проводились с помощью актинометра Эппли (УФ-область спектра), причем результаты измерений фиксировались ежеминутно. Таким образом, в течение светового дня производилось 650–700 отсчетов. По результатам измерений были рассчитаны значения оптической толщины атмосферы и ее аэрозольной составляющей. Эти данные для 12 дней наблюдений и были использованы для анализа методом нормированного размаха.

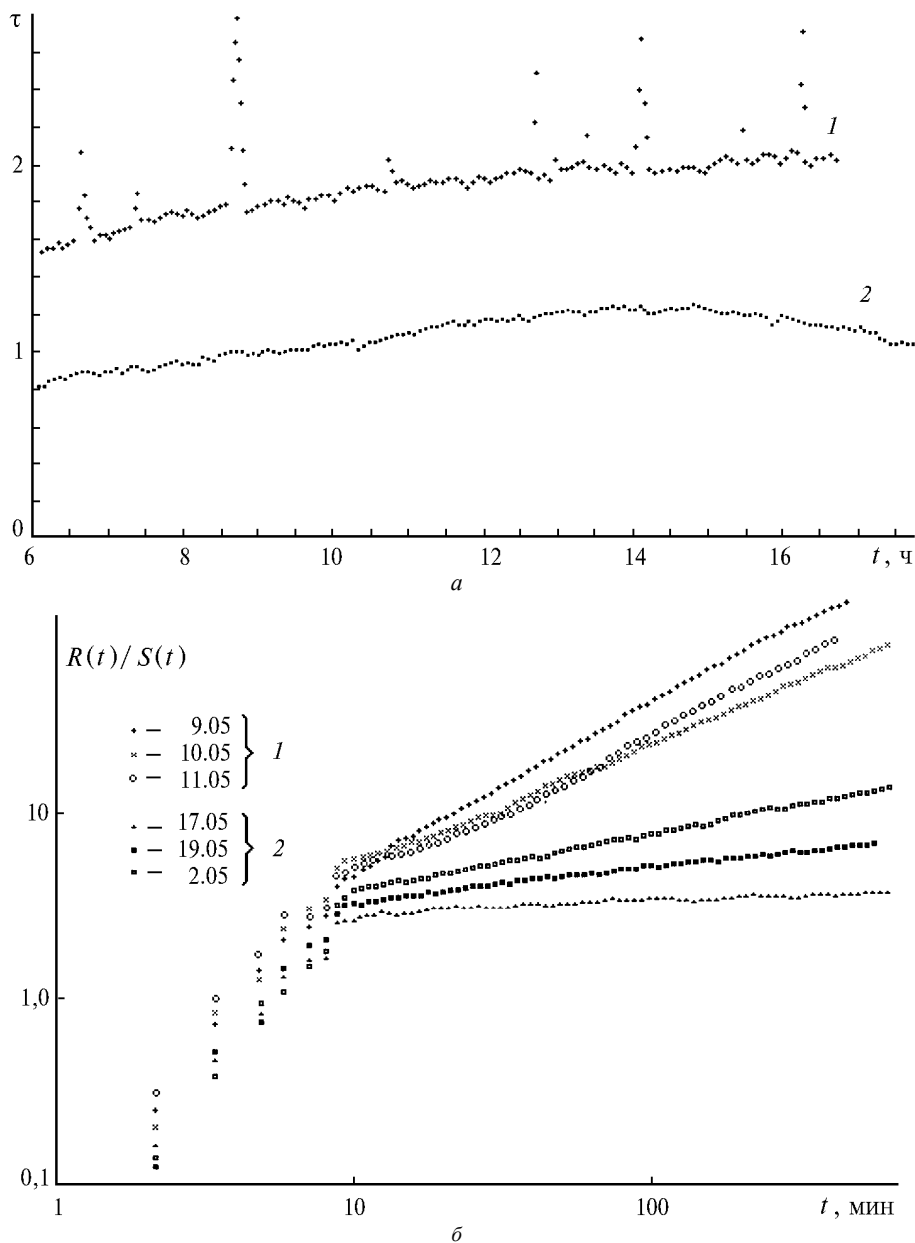


Рис. 3. Типичные для дней с повышенной вулканической активностью (1) и с «нормальными» условиями (2) кривые дневного хода аэрозольной составляющей оптической толщины атмосферы (а) и соответствующие зависимости нормированного размаха (б)

В период измерений наблюдалось периодическое повышение вулканической активности. На графиках рис. 3,а, где в качестве примера приведены результаты измерений для типичных дней рассмотренного периода, четко просматривается различие ситуации в дни с повышенной вулканической активностью и при «нормальных» условиях – в первом случае на фоне в среднем несколько более высоких, чем наблюдаются обычно, значений оптической толщины периодически наблюдаются существенные всплески (иногда кратковременное увеличение в 1,5–2 раза и более).

На рис. 3,б приведены графики временной зависимости нормированного размаха (следует отметить, что, в отличие от рис. 1 и 2, рис. 3, б имеет чисто иллюстративный характер – в области $t > 10$ мин здесь приведены кривые, построенные на основе соответствующих условных знаков, относящихся к отдельным дням наблюдений и наглядно демонстрирующие характер полученных зависимостей). Учитывая практически полное совпадение результатов для атмосферного ослабления и его аэрозольной составляющей, приведены кривые только для аэрозольной компоненты оптической толщины.

Все дни с повышенной вулканической активностью можно объединить в одну группу, для которой значения показателя Херста варьируют в диапазоне $H = 0,60 \pm 0,83$, в то время как при «нормальных» условиях $H \leq 0,3$.

При поверхностной оценке полученных здесь результатов можно предположить, что они противоречат друг другу: при анализе отдельных выборок обнаруживаются существенно разные значения постоянной Херста. Однако учитывая отмеченное выше влияние суточных и сезонных вариаций на получаемые оценки постоянной Херста, можно утверждать, что в исследованных случаях мы наблюдаем проявления разных процессов, характеризующихся принципиально различными временными масштабами – если данные [6,7,8,10] (см. рис. 1 и 2) относятся к изменениям оптических толщин атмосферы ото дня ко дню, обусловленным сменной воздушных масс, на которые, возможно, накладываются сезонные изменения аэрозольного состояния атмосферы, то для данных, рассматриваемых на рис. 3, определяющее значение имеют внутрисуточные вариации (дни с «нормальными» условиями) или аperiodические внешние воздействия (вулканические выбросы).

Особый интерес, по нашему мнению, представляет обнаружение существенного различия значений постоянной Херста H в периоды повышенной вулканической активности и при «нормальных» условиях. Как представляется, этот эффект может быть связан с принципиальными различиями основных источников аэрозолей и пространственного распределения атмосферных аэрозолей в эти периоды.

Авторы пользуются возможностью высказать благодарность руководству Колимского университета (Мексика) за предоставленную возможность использования для анализа данных актинометрических наблюдений.

1. Hurst H.E., Black R.P., Simaika Y.M. Long-term storage: an experimental study // Constable. London, 1965. 240 p.
2. Федер Ф. Фракталы. М.: Мир, 1991. 260 с.
3. Feller W // Ann. Math. Stat. 1951. V. 22. N 2. P. 427–431.
4. Mandelbrot B.B., Van Ness J.W. Fractional Brownian motions, fractional noises and applications // SIAM Rev. 1968. V. 10. N2. P. 422–437.
5. Mandelbrot B.B. Fractals, Form, Chance and Dimension. Freeman, San-Francisco. 1977.
6. Бадинов И.Я., Андреев С.Д. // Пробл. физ. атмосферы. Вып. 3. Л.: Изд-во ЛГУ, 1965. С. 160–173.
7. Кондратьев К.Я., Бадинов И.Я., Ащеулов С.В., Андреев С.Д. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1965. Т. 1. N 2. С. 175–192.
8. Кабанов М.В., Панченко М.В., Пхалагов Ю.А. и др. Оптические свойства прибрежных атмосферных дымок. Новосибирск: Наука, 1988. 201 с.
9. Андреев С.Д., Зуев В.Е., Ивлев Л.С. и др. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1972. Т. 8. N 12. С. 1261–1267.
10. Ивлев Л.С. Химический состав и структура атмосферных аэрозолей. Л.: Изд-во ЛГУ, 1982. 366 с.
11. Abbot C.G., Fowle F.E. // Ann. Astrophys. Observ. Smithsonian Inst. 1906. V. III. P. 21–46; 1922. V. IV. P. 323–360.

Научно-исследовательский институт физики
при Санкт-Петербургском государственном университете

Поступила в редакцию
1 августа 1997 г.

S. D. Andreev, L.S. Ivlev. Temporal and Spatial Variation of Optical and Aerosol Characteristics Fields in the Atmosphere. Part I. Optical Characteristics of the Atmosphere.

The results of the normalized amplitude method application to analysis of temporal series of the atmospheric optical thickness and its aerosol component observations in the Visible and near IR are treated in the first part of the paper. The values of the Hurst factor are shown to differ significantly from $H = 0.5$ which testifies to nonrandomness of the formation process of the atmospheric radiation regime. The found coincidence of the H values for the atmospheric thickness and its aerosol component confirms the determining role of aerosols in this process and the identity of the mechanisms governing the variation of the values under analysis.

The 24-hour variation of the aerosol component therewith is found to be principally different under enhanced volcanic activity and under standard conditions.