

## ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ, ГИДРОСФЕРЫ И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

УДК 519.2

# Турбулентное перемешивание озона и аэрозоля в стратосфере

О.Е. Баженов<sup>1</sup>, А.В. Невзоров<sup>1</sup>, Н.С. Сальникова<sup>1</sup>,  
А.В. Ельников<sup>2</sup>, В.А. Логинов<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН  
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

<sup>2</sup>Сургутский государственный университет  
628403, г. Сургут, пр. Ленина, 1

Поступила в редакцию 10.02.2021 г.

Представлены временные ряды общего содержания озона и интегрального коэффициента обратного аэрозольного рассеяния в стратосфере, полученные на Сибирской лидарной станции в Томске. В частотных спектрах энергии этих временных рядов четко проявляются годовые гармоники, а во временном ряде содержания озона – и полугодовая компонента. Представление частотных спектров обеих стратосферных составляющих в логарифмическом масштабе позволило выявить в них участки, характерные для турбулентного движения и, следовательно, каскадной передачи энергии от более крупных вихрей мелким, в частности в спектре энергии общего содержания озона.

*Ключевые слова:* временные ряды, стратосфера, интегральный коэффициент обратного аэрозольного рассеяния, общее содержание озона, Фурье-преобразование, инерционный масштаб турбулентности; time series, stratosphere, integrated aerosol backscattering coefficient, total ozone

### Введение

Озон и аэрозоль являются оптически активными составляющими воздуха, и их образования в виде соответствующих полей или слоев существенно влияют на перенос оптического излучения в атмосфере и, как следствие, на климат [1–5]. Этим определяются актуальность и неослабевающий интерес к изучению этих компонент как в плане их фундаментальности, так и в плане взаимодействия с другими составляющими и процессами атмосферы [6–8].

Исследования этих компонент атмосферы ведутся в течение длительного времени в Институте оптики атмосферы СО РАН на Сибирской лидарной станции (СЛС) в г. Томске (56,48° с.ш., 85,05° в.д.). Один из аспектов исследований – регулярные наблюдения и последующее накопление временных рядов общего содержания озона (ОСО) и интегрального (по высотному диапазону 15–30 км) коэффициента обратного аэрозольного рассеяния (ИКОАР), которое характеризует аэрозольное наполнение стратосферы [3]. Измерения озона осуществляются

с помощью озонметра М-124, в основу работы которого положен спектрофотометрический метод [9, 10], а ИКОАР определяется из данных лидарного зондирования вертикального распределения аэрозоля. Методика и аппаратура получения этого параметра стратосферного аэрозольного слоя, представлены в [11].

Регулярность и длительность наблюдений позволяют говорить об уникальности полученных рядов, которые можно использовать для разноплановых анализов. В [12] представлен статистический анализ временного ряда ОСО, охватывающий период с 1994 по 2017 г., с временным разрешением 1 сут, т.е. для анализа используется 8766 ежесуточных отсчетов. Результаты подобного анализа ИКОАР приведены в [13]. Хотя регулярные наблюдения за состоянием стратосферного аэрозоля ведутся на СЛС с 1986 г., для исследований был использован более короткий временной отрезок (2000–2016 гг.) и, более того, ряд представлен подекадными значениями ИКОАР. Выбор такого грубого усреднения определяется тем, что при наличии облачности лидарное зондирование в стратосфере зачастую технически неосуществимо. Поэтому даже при подекадно усредненных значениях во временном ряде ИКОАР есть пропуски, и в целом ряд ИКОАР имеет 612 отсчетов (36 декад × 17 лет) с учетом пропусков.

Цель настоящей работы – проверка гипотезы вовлечения атмосферного озона и стратосферного

\* Олег Елисеевич Баженов (boe@iao.ru); Алексей Викторович Невзоров (nevzovov@iao.ru); Наталья Сергеевна Сальникова (salnikova@iao.ru); Андрей Владимирович Ельников (andreyeln@mail.ru); Вадим Андреевич Логинов (dirkloginov@gmail.com).

аэрозоля в процесс крупномасштабного турбулентного перемешивания. Для этого используются временные ряды ОСО и ИКОАР, о которых говорилось выше, трансформированные к виду фундаментального соотношения турбулентного перемешивания

$$E(\nu) = C\nu^{-5/3}. \quad (1)$$

Здесь  $E(\nu)$  – энергия флуктуаций на соответствующей частоте;  $C$  – константа, определяемая анализируемым параметром;  $\nu$  – частота. Уравнение (1) представляет Фурье-образ известного закона Колмогорова–Обухова («двух третей»): в инерционном интервале турбулентности каскадная передача энергии от больших пространственных неоднородностей к малым происходит согласно зависимости «2/3» [14, 15].

## Периодограммы и спектры ОСО и ИКОАР: анализ и обсуждение

Временные ряды ОСО и ИКОАР, дающие начало рассмотрению сформулированной проблемы, приведены на рис. 1.

Фурье-образы этих временных рядов в виде периодограмм представлены на рис. 2. Периодограммы были получены с помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ) [16, 17]. БПФ работает с рядами, длительность которых кратна двойке ( $2^n$ ). Недостающие и пропущенные значения ряда заполняются нулями. На рис. 2, *a* и *б* наблюдаются четко выраженные пики, частота которых совпадает с колебаниями атмосферных процессов.

В Фурье-периодограмме ОСО (рис. 2, *a*) наибольший пик приходится на гармонику, соответствующую 372 сут, т.е. близкую годовым колебаниям. Эта гармоника в явном виде присутствует и во временном ходе ОСО как периодический процесс (см. рис. 1, *a*). Амплитудное значение этой гармоники – примерно 0,07 отн. ед. Следующий выделяющийся в спектре пик приходится на гармонику, по значению близкую к полугоду (182 сут). Его величина – 0,02 отн. ед., что примерно в 3,5 раза меньше годовой гармоники, но, с другой стороны, в 3 раза больше, чем амплитуда еще одной гармоники, отмеченной на рис. 2 (630 сут), и всех остальных, наблюдающихся в периодограмме. Наличие полугодовой гармоники на рис. 2 не противоречит

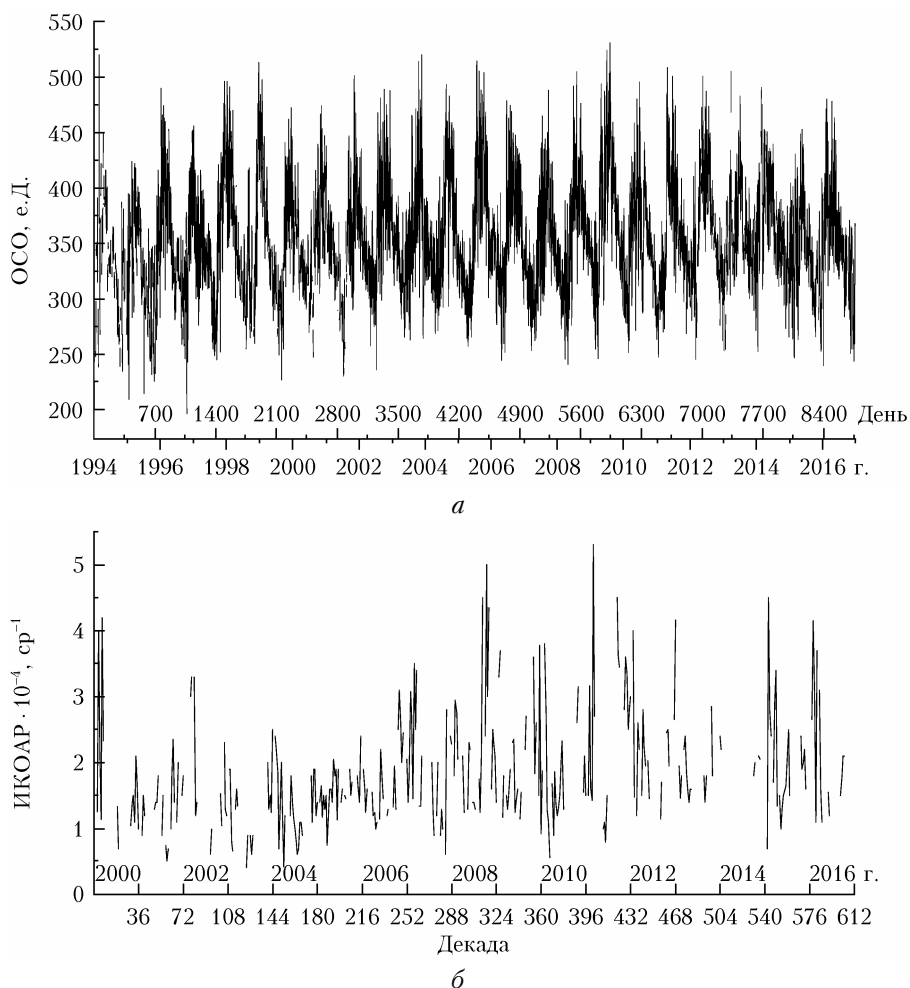


Рис. 1. Временной ход над Томском: *a* – ОСО в 1994–2017 гг.; *б* – ИКОАР в 2000–2016 гг.

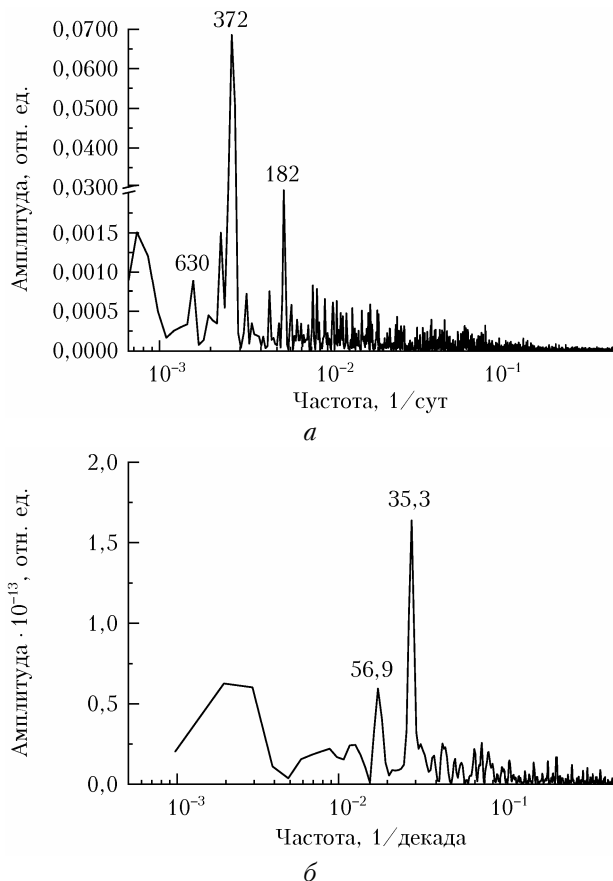


Рис. 2. Периодограмма временного ряда: *a* – ОСО (числа на рисунке – значения наблюдаемых гармоник в сутках); *б* – ИКОАР (числа на рисунке – значения наблюдаемых гармоник в декадах)

исследованиям других авторов, которые для анализа годового хода ОСО в Северном полушарии используют разложение в ряд вида [18, 19]:

$$X = X_0 + c_1 \cos(\omega t - \varphi_1) + c_2 \cos(2\omega t - \varphi_2), \quad (2)$$

где  $X$  – амплитуда ОСО в годовом ходе;  $X_0$  – среднее ОСО в пятиградусной (десятиградусной) зоне;  $\omega$  – частота с периодом  $2\pi/T$  ( $T = 365$  дней);  $c_1$  и  $c_2$  – амплитуды соответствующих гармоник.

На периодограмме ИКОАР (рис. 2, б) выделяется гармоника, соответствующая 35,3 декадам, или ~353 сут. Ее амплитуда в 3 раза превышает выделенную на периодограмме гармонике 56,9 декад, а все остальные еще меньше. Анализ периодограмм показал, что наблюдаемые на них пики имеют естественное происхождение и формируются атмосферными процессами. Это позволяет сделать вывод, что информация, содержащаяся во временных рядах, репрезентативна.

Известно, что значения периодограмм – случайные величины, ошибка которых равна самому значению [16, 17]. Поэтому для увеличения статистической обеспеченности к ним была применена процедура скользящего среднего. Сглаживание периодограммы ОСО проводилось с использованием 15 точек, а ИКОАР – с использованием 7 точек. В ре-

зультате случайная ошибка наблюдаемых гармоник уменьшилась, соответственно, в  $\sqrt{15}$  и  $\sqrt{7}$  раз. Сами периодограммы приобрели смысл спектра плотности энергии, приходящейся на каждую гармонику, но их локализация по частотному диапазону растянулась до 15 и 7 точек [16, 17]. Годовой пик ОСО стал «размазан» по диапазону  $372 \pm 15$  сут, полугодовой – по  $182 \pm 15$  сут, а годовой пик ИКОАР – по  $35,3 \pm 7,0$  декад.

Эти Фурье-спектры в логарифмическом масштабе представлены на рис. 3.

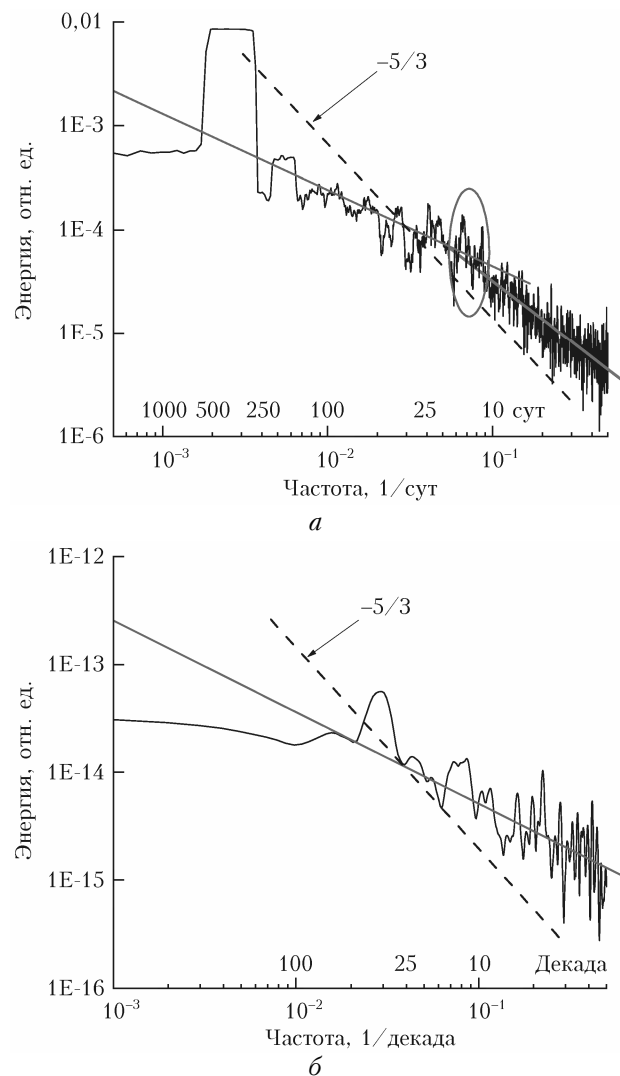


Рис. 3. Спектр плотности энергии временного ряда: *a* – ОСО; *б* – ИКОАР

Применение логарифмического масштаба по обеим координатным осям приводит экспоненциальное выражение (1) к линейному виду

$$\ln[E(\nu)] = \ln[C\nu^{-5/3}]; \quad y = -\frac{5}{3}x + C,$$

$$\text{т.е. } \ln[E(\nu)] = y; \quad \ln[\nu] = x, \quad (3)$$

что значительно облегчает сравнение экспериментальных данных с теоретической зависимостью, ко-

торая представляет собой прямую с тангенсом угла наклона  $-5/3$ , т.е.  $-1,67$ . Это пунктирная прямая на рис. 3. Однако экспериментальные значения спектра ОСО на нее не ложатся. Причем сам спектр ОСО состоит из двух участков, граница между которыми приходится на частоту  $0,05 \div 0,06 \text{ сут}^{-1}$ , или  $\sim 1,5 \div 2$  декады. Высокочастотные значения энергии спектра (участок № 1), лежащие справа от этой границы, хорошо аппроксимируются линейной зависимостью, параметры которой представлены в таблице. Низкочастотный участок спектра (участок № 2) также можно аппроксимировать прямой, но с другим значением тангенса угла наклона (также см. таблицу).

В спектре энергии ИКОАР излом спектра отсутствует, а весь спектр в целом аппроксимируется прямой линией, параметры которой приведены в таблице.

Параметры аппроксимирующей прямой  $y = B \cdot x + A$

Участок	$B$	$A$	$R^*$
ОСО № 1	$-1,223 \pm 0,012$	$-5,717 \pm 0,007$	$-0,869$
ОСО № 2	$-0,734 \pm 0,021$	$-5,087 \pm 0,032$	$-0,792$
ИКОАР	$-0,849 \pm 0,026$	$-15,142 \pm 0,022$	$-0,813$

\*  $R$  – коэффициент корреляции.

Известно, что турбулентность имеет разные пространственно-временные масштабы [20]. Они определяются колебательными процессами в атмосфере, которые создают избыток энергии в том или ином частотном диапазоне. Но при любом масштабе турбулентного движения присутствуют три интервала: внешний, инерционный и внутренний. Внешний интервал является источником турбулентного движения. В инерционном интервале происходит каскадная передача энергии от больших вихрей к меньшим. Во внутреннем масштабе турбулентное движение вырождается [21, 22]. Причем, как показали результаты многочисленных экспериментальных исследований атмосферной турбулентности, прямая скорости передачи энергии в инерционном интервале может иметь как больший, так и меньший наклон, нежели  $-5/3$ . Больший наклон обусловлен дополнительной причиной, приводящей к дополнительному поглощению энергии турбулентного потока в этом инерциальном интервале, а меньший наклон – наличием дополнительного источника энергии [21].

Атмосферный озон не является консервативной примесью. Он постоянно генерируется в результате фотохимических реакций. Вероятно, этот процесс является источником дополнительной энергии, восполняющим ее потерю при каскадной передаче энергии от больших вихрей к меньшим согласно закону  $-5/3$ , и формирует тангенс угла наклона  $-1,223$ . Переход от внешнего интервала к инерционному приходится примерно на две недели. Это указывает на то, что источником энергии исследуемой крупномасштабной турбулентности, которая увлекает своим движением атмосферный озон, являются планетарные процессы.

На временном ряде ИКОАР из-за более грубой дискретизации (первая декада) наблюдается, вероятно, только внешний масштаб турбулентности, поскольку начало этого ряда приходится на частоту, соответствующую двум декадам, т.е. 20 дням, а именно с этой частоты в спектре ОСО как раз и начинается инерционный интервал.

## Заключение

Проанализированы результаты долговременных наблюдений общего содержания озона и интегрального коэффициента обратного аэрозольного рассеяния в стратосфере для выявления в них характерных особенностей турбулентного движения. Анализ позволил выявить доминирующие колебания в исследуемых временных рядах и рассмотреть тенденции изменения спектров энергии ОСО и ИКОАР. В целом спектры энергий этих параметров стратосферы не противоречат друг другу, но из-за более грубой дискретизации временного ряда ИКОАР (декады) по сравнению с ОСО (сутки) временной ряд ОСО более информативен и в нем проявляется инерционный интервал турбулентного движения. Начало инерционного интервала приходится на частотный диапазон  $0,05-0,06 \text{ сут}^{-1}$ , что соответствует  $20 \div 16$  сут, т.е. получена количественная характеристика макромасштабного турбулентного движения, которая свидетельствует о том, что источник энергии этого движения – планетарные процессы.

Проявление характеристик турбулентного движения в спектре ОСО не противоречит известному факту, что турбулентное движение охватывает всю атмосферу вплоть до 100 км и приводит к неизменному в процентном отношении составу постоянных газов атмосферы ( $78,09\% - \text{N}_2$ ;  $20,95\% - \text{O}_2$ ;  $0,93\% - \text{Ar}$  и т.д.) в единице объема [23].

Работа выполнена в рамках государственного задания ИОА СО РАН (в части получения результатов измерений) и при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-47-860014) (в части обработки и анализа результатов).

1. *Атмосфера*. Справочник (справочные данные, модели). Л.: Гидрометеоиздат, 1991. 509 с.
2. *Зуев В.Е., Тутов Г.А.* Оптика атмосферы и климат // Современные проблемы атмосферной оптики. Томск: Спектр, 1996. Т. 9. 270 с.
3. *Вулканы, стратосферный аэрозоль и климат Земли* // под ред. С.С. Хмелевцова. Л.: Гидрометеоиздат, 1986. 255 с.
4. *Lenton T.M., Vaughan N.E.* The radiative forcing potential of different climate geoengineering options // *Atmos. Chem. Phys.* 2009. V. 9. P. 5539–5561. DOI: 10.5194/acp-9-5539-2009.
5. *Rasch P.J., Crutzen P.J., Coleman D.B.* Exploring the geoengineering of climate using stratospheric sulphate aerosols: The role of particle size // *Geophys. Res. Lett.* 2008. V. 35. P. L02809. DOI: 10.1029/2007GL032179.
6. *Шаламянский А.М.* Концепция взаимодействия атмосферного озона и воздушных масс Северного полушария // Тр. Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. 2013. № 568. С. 173–194.

7. Белан Б.Д., Ивлев Г.А., Скляднева Т.К. Исследование взаимосвязи ультрафиолетовой радиации с метеорологическими факторами и замутнением атмосферы. Часть I. Роль общего содержания озона, облачности и аэрозольной оптической толщи // Оптика атмосф. и океана. 2020. Т. 33, № 8. С. 648–655; Belan B.D., Ivlev G.A., Sklyadneva T.K. The relationship between ultraviolet radiation and meteorological factors and atmospheric turbidity: Part I. Role of total ozone content, clouds, and aerosol optical depth // Atmos. Ocean. Opt. 2020. V. 33, N 6. P. 638–644.
8. Семенов А.И., Липатов К.В., Перминов В.И., Шефов Н.Н. Модель вариаций озона мезосферы по измерениям излучения инфракрасной атмосферной системы молекулярного кислорода // Докл. АН. 2013. Т. 449, № 3. С. 342–350.
9. Гуцын Г.П., Виноградова Н.Н. Суммарный озон в атмосфере. Л.: Гидрометеоиздат, 1983. 288 с.
10. Перов С.П., Хргиан А.Х. Современные проблемы стратосферного озона. Л.: Гидрометеоиздат, 1980. 237 с.
11. Ельников А.В., Маричев В.Н., Шелевой К.Д., Шелефонтьев Д.И. Лазерный локалатор для исследования вертикальной стратификации аэрозоля // Оптика атмосф. 1988. Т. 1, № 4. С. 117–123.
12. Баженов О.Е., Ельников А.В., Сысоев С.М. Общее содержание озона над Томском в период 1994–2017 гг.: результаты статистического анализа // Оптика атмосф. и океана. 2019. Т. 32, № 7. С. 556–561; Bazhenov O.E., Elnikov A.V., Sysoev S.M. Total ozone content over Tomsk in 1994–2017: Results of statistical analysis // Atmos. Ocean. Opt. 2019. V. 32, N 6. P. 680–685.
13. Долгий С.И., Невзоров А.В., Сальникова Н.С., Ельников А.В., Сысоев С.М., Логинов В.А. Методические аспекты анализа временных рядов на примере общего содержания аэрозоля в стратосфере // Вестн. кибернетики. 2018. № 4. С. 29–37.
14. Колмогоров А.Н. Рассеяние энергии при локально изотропной турбулентности // Докл. АН СССР. 1941. Т. 32, № 1. С. 19–21.
15. Обухов А.М. О распространении энергии в спектре турбулентного потока // Изв. АН СССР. Сер. геогр. и геофиз. 1941. Т. 5, № 4–5. С. 453–466.
16. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. СПб.: Питер, 2003. 604 с.
17. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных. М.: Книга, 2012. 541 с.
18. Хргиан А.Х. Физика атмосферного озона. Л.: Гидрометеоиздат, 1973. 291 с.
19. Кашкин В.Б., Рублева Т.В., Хлебопрос Р.Г. Стратосферный озон: вид с космической орбиты: монография. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2015. 184 с.
20. Монин А.С. Прогноз погоды как задача физики. М.: Наука, 1969. 184 с.
21. Винниченко Н.К., Пинус Н.З., Шметер С.М., Шур Г.Н. Турбулентность свободной атмосферы. Л.: Гидрометеоиздат, 1975. 285 с.
22. Pope S.V. Turbulent Flows. Cambridge: Cambridge University Press, 2000. 771 p.
23. Матвеев Л.Т. Физика атмосферы. СПб.: Гидрометеоиздат, 2000. 777 с.

*O.E. Bazhenov, A.V. Nevzorov, N.S. Salnikova, A.V. Elnikov, V.A. Loginov. Turbulent mixing of ozone and aerosol in the stratosphere.*

We present the time series of the total ozone content and integrated aerosol backscattering coefficient in the stratosphere obtained at Siberian Lidar Station in Tomsk. Annual harmonics are distinctly manifested in the frequency spectra of energies of these time series, as well as the semiannual component in ozone time series. Representation of the frequency spectra of both stratospheric constituents on a logarithmic scale made it possible to identify in these spectra the intervals, characteristic for turbulent motion and, hence, cascade energy transfer from larger to smaller eddies and, in particular, in the energy spectrum of the total ozone content. However, the slope of the linear interval is not  $-1.67$ , as it would in obedience to the Kolmogorov–Obukhov law, but smaller ( $-1.22$ ), indicating the presence of an additional energy source which contributes to the frequency variations in the total ozone content.