

Сезонная и долговременная изменчивость зонально осредненных полей ОСО

Г.М. Крученицкий^{1,2}, К.А. Статников^{2*}

¹Центральная аэрологическая обсерватория

141700, Московская обл., г. Долгопрудный, ул. Первомайская, 3

²Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)

141701, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Поступила в редакцию 14.01.2019 г.

Исследованы зонально осредненные поля сезонной и долговременной изменчивости общего содержания озона (ОСО), включая приполярные области. Показано, что долговременная изменчивость всех указанных рядов (с пространственным разрешением 3° широты) сводится к параметрическому резонансу с наименьшей из частот приливных колебаний (период 18,6 года). После исключения этого эффекта тренды рядов для всех широтных поясов становятся исчезающе малыми (имеющими разные знаки) и статистически незначимыми. Полученные результаты несовместимы с антропогенной версией «истощения озонового слоя». Указано, что обнаруженное явление параметрического резонанса наблюдается и в литосфере применительно к глобальной тектонической активности.

Ключевые слова: озон, сезонная и долговременная изменчивость, тренды, приливные колебания, параметрический резонанс; ozone, seasonal and long-term variability, trends, tidal fluctuations, parametric resonance.

Введение

Вопрос о причинах наблюдаемых долговременных изменений в состоянии озонового слоя Земли на протяжении последних четырех десятилетий привлекает к себе внимание не только специалистов, но и широкой общественности. Суть имеющихся в мировом научном сообществе разногласий по этому вопросу и экономические аспекты проблемы изложены в нашем обзоре [1]. Тем не менее на сегодняшний день сам заголовок работы [2], призванной резюмировать точку зрения международного научного сообщества на характер долговременных изменений, подчеркивает однонаправленный характер и антропогенную природу таких изменений. На такой оценке основаны и международные конвенции, по замыслу направленные на защиту озонового слоя, — Монреальский протокол (1989 г.) и развивающие его соглашения, весьма обязывающие в экономическом отношении и оказывающие заметное влияние на химический сектор оборонной промышленности страны [1, 3].

Способы доказательств антропогенной природы изменений озонового слоя разбиваются на два больших класса: моделирование методами динамики атмосферы и химической кинетики и статистическое моделирование. К обоснованности этих доказательств

должны предъявляться общепринятые в естественных науках требования, прежде всего — повторяемость результатов. Это обусловлено тем, что принятие истинности этих доказательств имеет весьма обязывающие последствия в областях, далеких от «чистой» науки.

Настоящая работа посвящена анализу обоснованности результатов статистического моделирования, которые на сегодняшний день сводятся к вычислению глобальных и региональных отрицательных линейных трендов общего содержания озона (ОСО) и указанию доверительных интервалов для них. Поэтому применительно к моделированию методами динамики атмосферы и химической кинетики укажем лишь на два обстоятельства, подрывающих, на наш взгляд, уверенность в надежности их результатов:

— значительные неопределенности в значениях констант реакций (особенно тройных) [4] в химическом блоке, подробнее см. [5];

— отсутствие единственности решений и большая скорость нарастания погрешностей [6] в динамическом блоке.

Цели настоящей работы — статистическое описание рядов спутниковых наблюдений, получение параметров сезонной и долговременной изменчивости и их глобального распределения, а также выявление физических причин изменений озонового слоя. Для этого использованы данные спутникового зондирования [7], обеспечивающие наибольшую степень глобальности обзора, а также обладающие максимальной однородностью по сравнению с данными

* Григорий Михайлович Крученицкий (omd@caorhms.ru); Константин Андреевич Статников (Kos1301@mail.ru).

всех наземных средств измерения ОСО и наибольшей длиной рядов. Период анализа составил ~ 35 лет (1978–2014 гг., исключая время с мая 1993 по июль 1996 г. — лагуна в данных спутниковых измерений аппаратурой УФ-диапазона).

Методы анализа

Все данные спутниковых наблюдений были организованы в виде рядов ежесуточных отсчетов, осредненных:

- по ячейкам (с пространственным разрешением 3° широты \times 5° долготы);
- широтным зонам (с пространственным разрешением 3°);
- поверхности Земли с весами, пропорциональными площадям широтных зон (косинусам широт, соответствующих центру каждой из зон).

Размер ячейки соответствует наихудшему пространственному разрешению за всю историю наблюдений и по порядку величины совпадает с синоптическим масштабом. Далее в каждом из классов рядов (локальных, зональных и глобальных) методом регрессионного моделирования выделялась сезонная изменчивость на основе соотношения

$$X(t) = \sum_{k=0}^n [a_k \cos(k\omega t) + b_k \sin(k\omega t)] Rez_Y(t), \quad (1)$$

где $X(t)$ — значения ряда ОСО в момент t ; $\omega = 2\pi/T_Y$; $T_Y = 365,24$ сут — период первой гармоники годового хода; $Rez_Y(t)$ — остатки сезонного хода. Гармоники отбирались методом наименьших квадратов по значениям статистики Стьюдента [8] при уровне надежности 95%. Выделение сезонного хода перед анализом долговременной изменчивости выполнялось по следующим причинам:

1) для уменьшения дисперсии $Rez_Y(t)$ по сравнению с исходным рядом $X(t)$, что помогало надежнее выделять долговременную изменчивость из $Rez_Y(t)$;

2) потому что значения $X(t)$ в высокоширотных регионах в период полярной ночи важны для вычисления энергетического баланса климатической системы Земли, так как озон — парниковый газ.

Для рядов $Rez_Y(t)$ вычислялись значения тренда, а затем вновь выполнялся анализ с помощью соотношения

$$Rez_Y(t) = \sum_{k=0}^n [A_k \cos(k\Omega_2 t) + B_k \sin(k\Omega_2 t) + C_k \cos(k\Omega_3 t) + D_k \sin(k\Omega_3 t)] + Rez_{2-3}(t), \quad (2)$$

где $\Omega_n = 2\pi/nT_{\text{tide}}$; $T_{\text{tide}} = 18,6$ года — период, соответствующий наименьшей из частот в спектре приливных колебаний [9]; $Rez_{2-3}(t)$ — остатки моделирования долговременной изменчивости колебаниями с наименьшей из приливных частот и ее вторым и третьим унтерионами. Выбор модели (2) обусловлен тем, что при анализе долговременной изменчивости глобальной тектонической активности [10] был об-

наружен ее параметрический резонанс [11] с указанной частотой. Естественно было ожидать аналогичный эффект и в атмосфере как геосфере, гораздо более подверженной влиянию приливных явлений, чем литосфера. После построения модели (2) из рядов $Rez_{2-3}(t)$ вновь вычислялись значения линейного тренда для оценки относительных вкладов резонансных явлений и однонаправленных процессов в полную долговременную изменчивость поля ОСО. Полная модель представляет собой сумму моделей сезонной и долговременной изменчивости:

$$\begin{aligned} M(t) &= M_{\text{Seas}}(t) + M_{\text{LongTerm}}(t) = \\ &= \sum_{k=0}^n [a_k \cos(k\omega t) + b_k \sin(k\omega t)] + \\ &+ \sum_{k=0}^n [A_k \cos(k\Omega_2 t) + B_k \sin(k\Omega_2 t) + \\ &+ C_k \cos(k\Omega_3 t) + D_k \sin(k\Omega_3 t)]. \end{aligned} \quad (3)$$

Результаты анализа

Результаты, полученные при анализе сезонной изменчивости поля ОСО, в очень обобщенном виде показаны на рис. 1 (цв. вкладка). Прежде всего, обращает на себя внимание существенная противофазность сезонных ходов в приполярных широтах обоих полушарий: весеннему максимуму в Северном полушарии соответствует весенний минимум в Южном. Это в основном и обуславливает эффект так называемой весенней антарктической озоновой дыры. Несостоятельность ее объяснения на основании фреоновой версии и неизбежность наличия годовой периодичности в ее формировании детально обоснованы в нашей работе [5].

Кроме того, из рис. 1 хорошо видно, почему наименьшие значения ОСО наблюдались именно в Антарктике весной. Заметный вклад в формирование указанной аномалии, особенно в ее северной части, вносит и долговременная изменчивость.

Результаты, полученные при моделировании долговременной изменчивости глобального ОСО и зонального в одном из широтных поясов так называемой озоновой дыры, приведены на рис. 2. Из него, в частности, ясно, почему сторонники фреоновой версии истощения озонового слоя стали говорить [12] о том, что под благотворным влиянием Монреальского протокола озоновый слой восстанавливается и «антарктическая дыра» затягивается.

Из рис. 2, б видно, что в настоящее время фаза долговременных колебаний в южной полярной зоне соответствует росту ОСО; глобальное ОСО (рис. 2, а) относительно стабильно.

На рис. 3 приведен широтный ход СКО долговременной изменчивости ОСО и эффективности полной модели долговременной и сезонной зависимости ОСО от времени.

Из рис. 4 очевидно, что учет вклада низкочастотных приливных колебаний полностью исключает

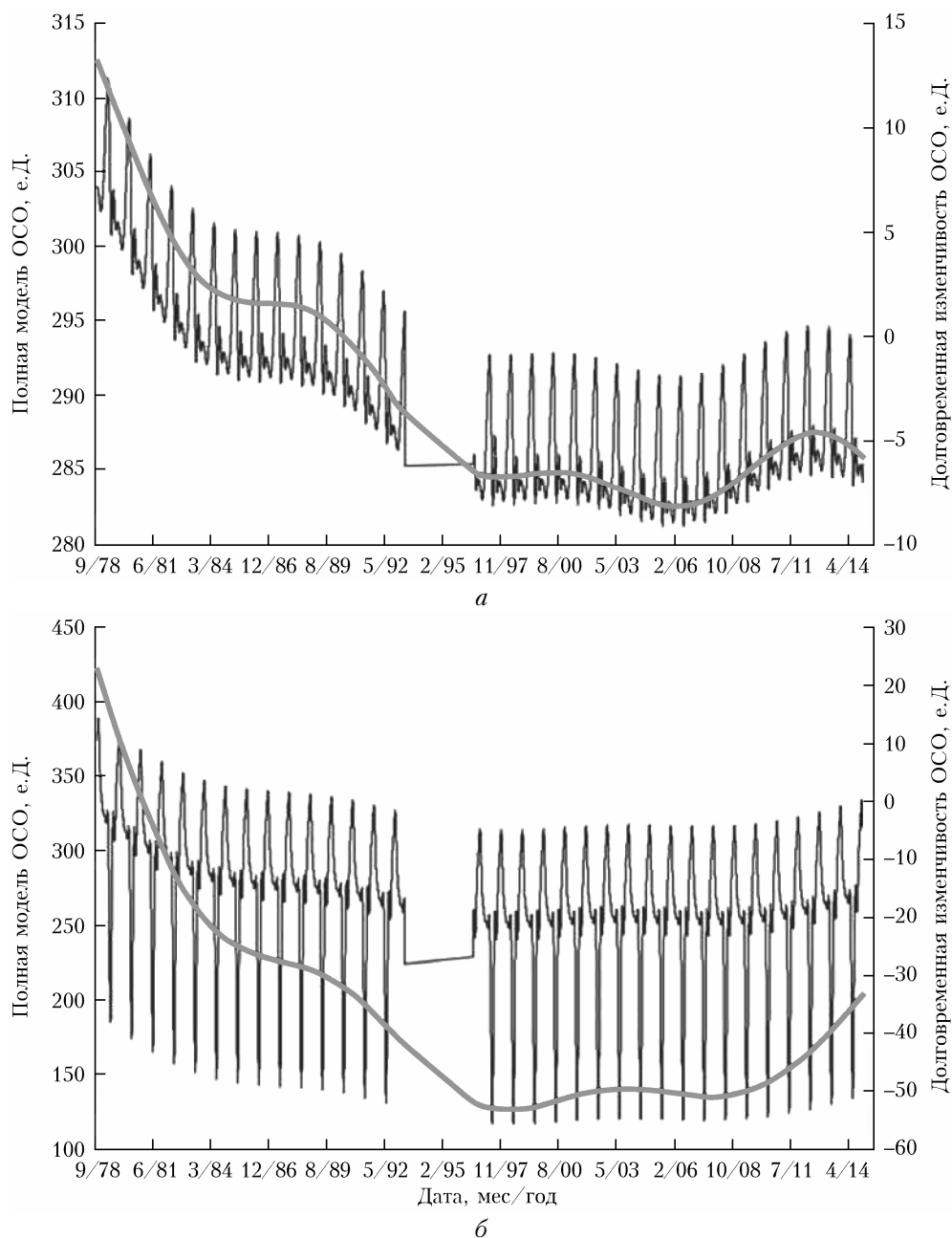


Рис. 2. Долговременная изменчивость (черная кривая) и полная модель ОСО (серая кривая): *a* — для среднглобальных значений; *б* — значений, осредненных по широтному поясу 66–69° с.ш.

отрицательные зональные тренды, а значит и саму возможность обсуждения антропогенного вклада в наблюдаемую изменчивость полей ОСО.

Кроме того, сравнение рис. 3 и 4 показывает следующее:

1) модель, учитывающая приливные колебания и параметрический резонанс озоносферы с ними, обладает эффективностью свыше 65%;

2) для широтного пояса, образующего кольцо, ограничивающее положение южного циркумполярного вихря, эффективность колебательной модели превышает 90%, что подтверждает отсутствие антропогенного вклада в образование весенней антарктической озоновой аномалии;

3) если до привлечения этих моделей к анализу остатков сезонного хода $Rez_{\gamma}(t)$ последние имели статистически значимые тренды, то после исключения из них колебательных эффектов тренды для всех широтных зон уменьшились на 2-3 порядка и утратили статистическую значимость, что полностью исключает возможность диагностики долговременной изменчивости в любой широтной зоне как антропогенно обусловленной.

Как повлиял учет долговременной изменчивости на величину трендов ОСО, пугающие значения которых послужили основным аргументом при обосновании необходимости подписания Монреальского протокола, видно из рис. 4.

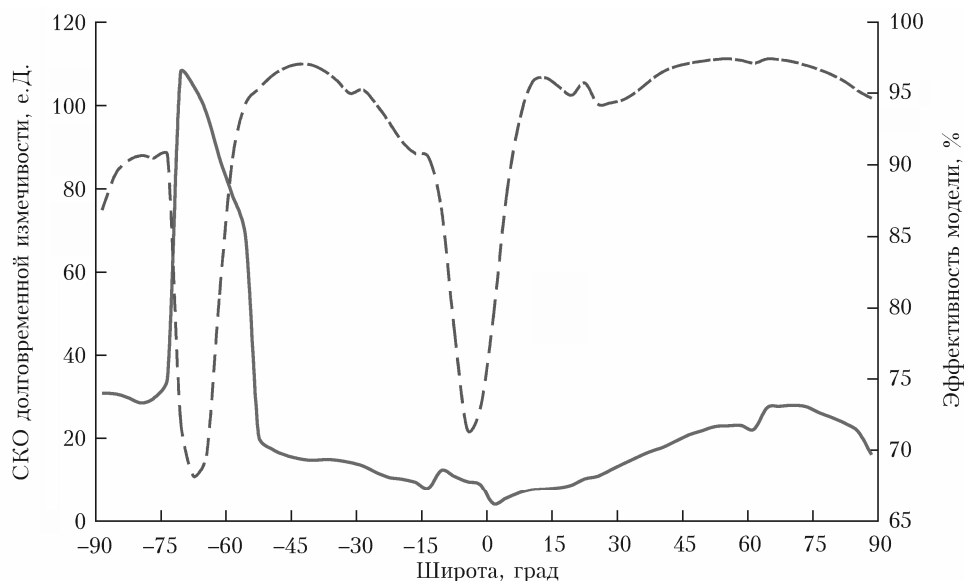


Рис. 3. Широтный ход СКО долговременной изменчивости ОСО (сплошная кривая) и эффективности полной модели (штриховая кривая)

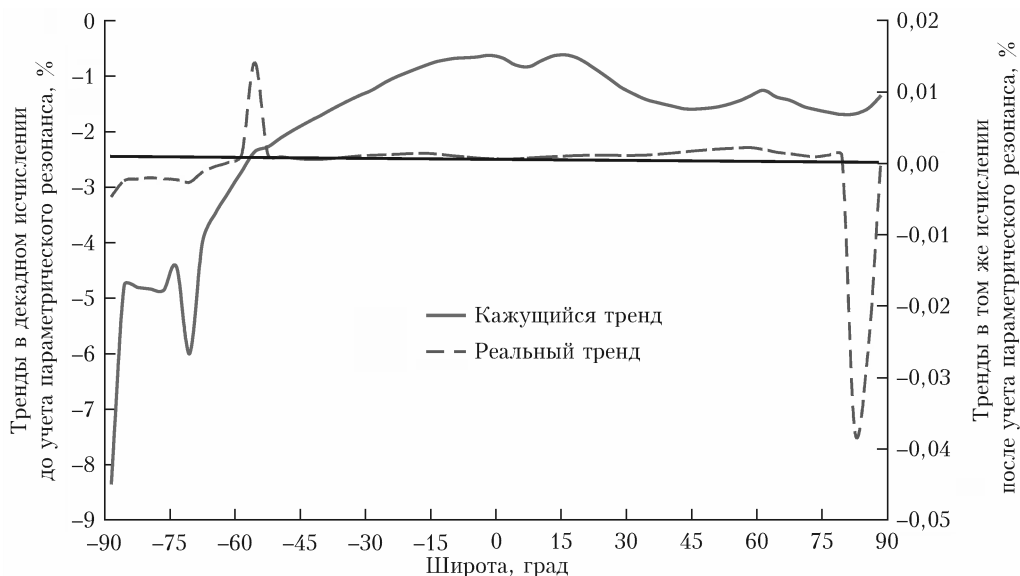


Рис. 4. Влияние учета долговременной изменчивости на величины зональных трендов ОСО (кажущийся тренд – тренд, вычисленный по остаткам сезонного хода до учета долговременной изменчивости, реальный тренд – то же после ее учета)

Особенно хорошо иллюстрирует адекватность колебательной модели ее применение к глобальному ОСО. Сравнение результатов измерений и модельных значений, а также уравнение регрессии, приведенные на рис. 5, и высокое значение эффективности модели однозначно свидетельствуют о том, что при современной погрешности спутниковых измерений ОСО (3–5% по разным оценкам [7]) получить более адекватную результатам прямых измерений модель крайне маловероятно.

Анализируя сходство остатков моделирования с белым шумом (общепринятый критерий полноты модели) отметим, что значения статистики Дарбина–Уотсона для всех широт принадлежат интервалу (1,96–2,04), для белого шума это значение равно

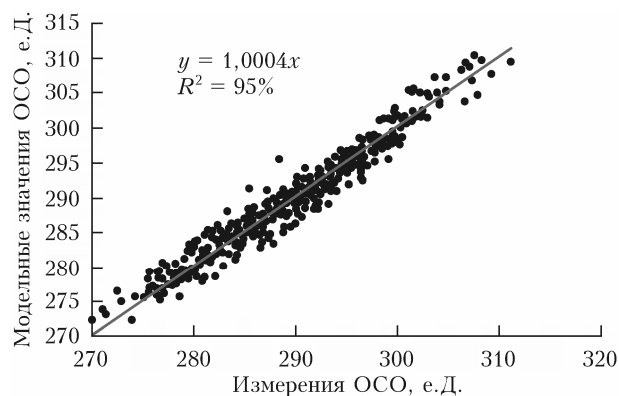


Рис. 5. Сравнение среднглобальных значений ОСО, полученных в полной модели с результатами измерений

двум, для интегрированной периодограммы остатков на любой широте прямая, проходящая через начало координат, описывает не менее 97% изменчивости (для белого шума – 100%). Это обстоятельство свидетельствует о том, что практически никакой иной информации о природе зональной и глобальной изменчивости ОСО, кроме сезонных и долгопериодных приливных колебаний, анализируемые ряды не содержат.

Понятен и физический механизм резонансного отклика озоносферы на медленные приливные колебания. Эти колебания порождают вертикальные движения в озоносфере, которые обуславливают, в соответствии с принципом Норманда–Добсона¹, уменьшение ОСО при восходящем движении и увеличение при нисходящем.

Заключение

В результате статистического моделирования сезонной и долговременной изменчивости поля ОСО установлено следующее:

1) так называемая антарктическая озоновая дыра в значительной мере обусловлена (особенно в южной части) сезонным ходом общего содержания озона, а в остальном формируется за счет долговременной изменчивости;

2) долговременная изменчивость зонально осредненных с шагом 5° широты ОСО полностью обусловлена параметрическим резонансом с приливными колебаниями с периодом 18,6 года, т.е. состоит из колебаний с периодами 55,8 и 37,2 года и их гармоник;

3) учет эффекта параметрического резонанса полностью исключает наличие любых трендов в эволюции поля ОСО и, следовательно, в очередной раз указывает на то, что научные предпосылки фреоновой версии «истощения озонового слоя» не бесспорны, что и ранее отмечали российские и зарубежные ученые [13–16].

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 16-05-00901а).

1. *Звягинцев А.М., Крученицкий Г.М.* Озоновый кризис: 20 лет спустя. Россия в окружающем мире: 2005 (Аналит. ежегодник) / под общ. ред. Н.Н. Марфени-

на, С.А. Степанова. М.: Модус-К – Этерна, 2006. С. 125–145.

2. *WMO, Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2018, Global Ozone Research and Monitoring Project. Report N 58.* WMO, 2019. 278 p.
3. *Мазурин И.М., Королев А.Ф., Уткин Е.Ф., Герасимов Р.Л.* Глобальная природоохранная гипотеза, создавшая глобальный кризис в выборе хладагентов // Пространство и время. 2015. Т. 3, № 21. С. 313–319.
4. *Jet Propulsion Laboratory. Chemical Kinetics and Photochemical Data for Use in Stratospheric Modeling // Evaluation 9, JPL Publication 90-1.*
5. *Звягинцев А.М., Зуев В.В., Крученицкий Г.М., Skorobogatyy T.B.* О вкладе гетерофазных процессов в формирование весенней озоновой аномалии в Антарктиде // Исследование Земли из космоса. 2002. № 3. С. 1–6.
6. *Арнольд В.И.* Математические методы классической механики. М.: Наука, 1979. С. 307–308.
7. *URL: http://toms.gsfc.nasa.gov/pub/omi/data/ozone/* (last access: 14.12.2018)
8. *Hudson D.J.* Lectures on elementary statistics and probability. Geneva, 1964. 242 p.
9. *Марчук Г.И., Каган Б.А.* Динамика океанских приливов. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 359 с.
10. *Statnikov K., Kruchenitsky G.* Statistical modelling of global tectonic activity and some physical consequences of its results // J. Systemics, Cybern. Inf. 2015. V. 13, N 1. P. 51–55.
11. *Ландау Л.Д., Lifshits E.M.* Механика. М.: Физматгиз, 1958. С. 103–109.
12. *Pawson S., Steinbrecht W., Charlton-Perez A.J., Fujiwara M., Karpechko A.Yu., Petropavlovskikh I., Urban J., Weber M.* Update on Global Ozone: Past, Present, and Future // WMO, Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2014. Report N 55. Geneva, 2014.
13. *Крученицкий Г.М., Бекорюков В.И., Волощук В.М., Звягинцев А.М., Кадыгров Н.Е., Кадыгрова Т.В., Перов С.П.* О вкладе динамических процессов в формирование аномально низких значений общего содержания озона в Северном полушарии // Оптика атмосфер и океана. 1996. Т. 9, № 9. С. 1233–1242.
14. *Зуев В.В.* Трансформация озонового слоя земной атмосферы – техногенная катастрофа или природное явление? // Оптика атмосфер и океана. 1996. Т. 9, № 9. С. 1171–1183.
15. *Maduro R., Schauerhammer R.* The Holes in the Ozone Scare: The Scientific Evidence that the Sky isn't Falling // Paris: Alcuin, 1992. 256 p.
16. *Ellsaesser H.W.* Why the U.S. should withdraw from the Montreal Protocol // 21st Century Science Tech. 1996. Spring. P. 51–53.

G.M. Kruchenitsky, K.A. Statnikov. Seasonal and long-term variability of the zonally averaged fields of TOC.

Zonal averaged fields of seasonal and long-term variability of the total ozone content (TOC), including polar regions, are investigated. It is shown that the long-term variability of all these series (with a spatial resolution of 3° latitude) is reduced to a parametric resonance with the lowest of the tidal oscillation frequencies (period of 18.6 years). After excluding this effect, series trends for all latitudinal zones become vanishingly small (having different signs) and statistically insignificant. The results are completely incompatible with the anthropogenic version of ozone depletion. It is stated that the phenomenon of parametric resonance is also observed in the lithosphere as applied to global tectonic activity.

¹Восходящее движение переносит озон из области максимума в область фотохимического равновесия, где он безвозвратно гибнет. Нисходящее движение переносит озон из области фотохимического равновесия (где его количество немедленно восстанавливается) в низлежащие слои, за счет чего ОСО возрастает.

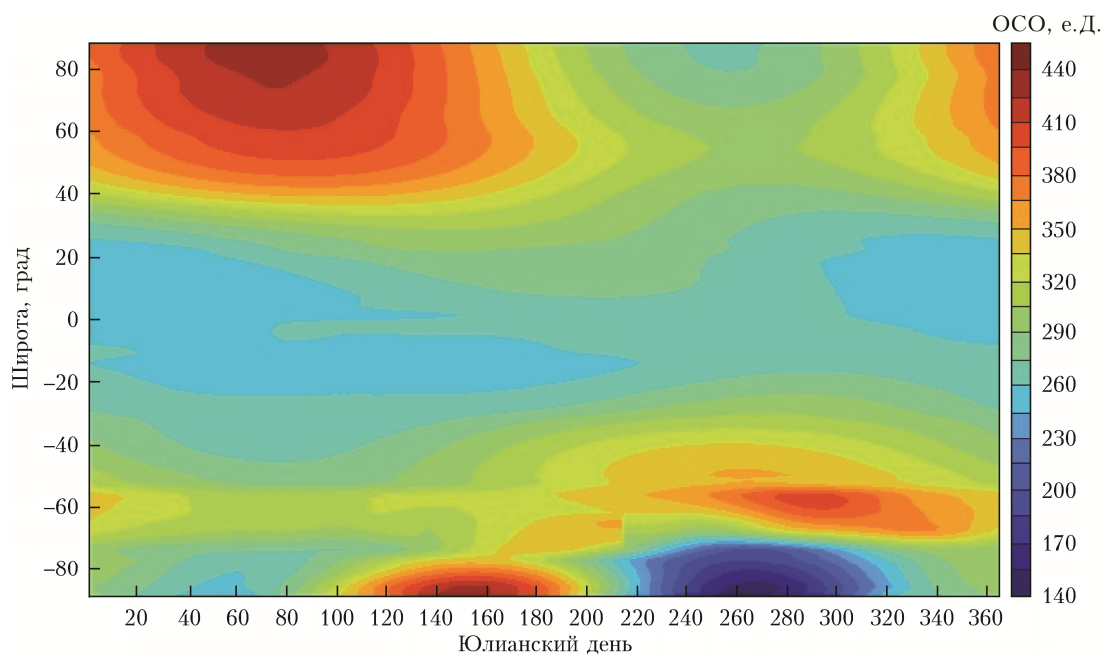


Рис. 1. Широтно-временной разрез сезонного хода ОСО по данным зонального осреднения