

УДК 551.501: 629.195.1

Доктор техн. наук	А.Х. Ахмеджанов ¹
Канд. физ.-мат. наук	Н.Д. Ахметов ¹
Канд. техн. наук	Т.К. Караданов ¹

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ СОДЕРЖАНИЯ ОЗОНА В АТМОСФЕРЕ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ НА ТЕРРИТОРИИ КАЗАХСТАНА

Ключевые слова: атмосфера, спектр, озон, концентрация, вертикальный профиль, спутниковое зондирование

Данные об озоне в атмосфере на территории Казахстана, полученные с помощью спутниковых систем, показывают, что до высоты 50 гПа содержания озона на западе Казахстана меньше, чем на востоке. Но на высотах 10...7 гПа концентрация озона на западе больше, чем на востоке. Разница максимальных значений содержания O_3 между западным профилем и восточным достигает 97 ppbv на высоте 7 гПа. Анализ внутригодовых распределений общего содержания O_3 показал, что ежегодные максимумы наблюдаются в феврале – апреле, а минимумы в октябре – декабре. По многолетним изменениям общего содержания O_3 по территории Казахстана был получен тренд, который показал уменьшение общего содержания озона на 1 % за период 2003...2017 годы.

В настоящее время большое значение придается исследованиям имеющегося и ожидаемого в ближайшие годы общего содержания озона в атмосфере и изменения параметров озонового слоя. Характер разрушения озонового слоя в зимне-весенний период и восстановления озонового слоя обуславливается динамическими процессами в атмосфере и высокой межгодовой изменчивостью циркуляции полярной стратосферы [1].

Содержание озона в атмосфере с высотой зависит не только от широты, но и от сезона. Летом обмен воздушными массами между тропосферой и стратосферой наиболее интенсивный. Распределение общего количества озона по месяцам года связано с атмосферной циркуляцией: озон распространяется в высокие широты из более низких (в верхней части стратосферы). Под влиянием антропогенных процессов распределение

¹ АО «НЦКИТ» НКА РК, г. Алматы, Казахстан

озона заметно изменяется, и как следствие могут изменяться динамические процессы в атмосфере, включая взаимодействие стратосферы и тропосферы. Анализ результатов наблюдений проводится с целью определения причин эпизодически возникающих озоновых аномалий и долговременных изменений озонового слоя. В конце января 2016 г. над севером Урала и Сибири впервые зарегистрирована озоновая мини-дыра ($ОСО < 220$ ед. Добсона), вызванная чрезвычайно интенсивным стратосферным полярным вихрем, в котором температура понизилась до значений, характерных для зимнего периода в Антарктике. Высокая межгодовая изменчивость динамических процессов полярной стратосферы Арктики может создать условия для значительного разрушения озонового слоя атмосферы [2]. Озон – как естественный источник инфракрасного излучения благотворно влияет на человека [6].

В настоящее время активно разрабатываются технологии дистанционного инфракрасного зондирования атмосферы для мониторинга термодинамического состояния и состава атмосферы Земли [3, 7, 9]. Создана база данных спектроскопической информации по атмосферным газам (HITRAN [8], GEISA [5], база данных температуры и концентраций оптически активных газовых составляющих атмосферы в базе TIGR [4], данные системы BADC и др. Системы GIOVANNI, GES-DISC объединяет данные многих спутниковых систем. Современные космические технологии измерений и вычислений содержания малых атмосферных газов с применением следующих приборов: AIRS, IASI, TANSO-FTS, MIPAS, TES, показали свою эффективность в исследованиях температуры подстилающей поверхности, стратификации атмосферы, атмосферных газов, химических процессов в тропосфере и стратосфере. Проводится атмосферный реанализ спутниковых данных с применением системы GMAO НАСА на уровне моделирования и ассимиляции спутниковых данных. Модель MERRA-2 – глобальный атмосферный реанализ спутниковых данных, произведенный глобальным управлением моделирования и ассимиляции НАСА (GMAO). Цели MERRA-2 заключаются в том, чтобы обеспечить систематизированный, однородный учет глобальной атмосферы и включить дополнительные аспекты климатической системы, включая газовые компоненты и улучшенное представление поверхности Земли. MERRA-2 является одной из первых глобальных реанализов спутниковых данных для ассимиляции космических наблюдений газов и аэрозолей, а также представления их взаимодействия с другими физическими процессами в

климатической системе. MERRA-2 предназначена заменить первоначально продукт MERRA, и отражает современные достижения в моделировании атмосферы.

Радиационный перенос в атмосфере определяется содержанием газов, поглощающих излучение, таких, как водяной пар, диоксид углерода, метан, озон, окись азота и др. Каждый из атмосферных газов на определенной частоте поглощает излучение иначе, чем другие газы. Для восстановления концентрации атмосферных газов используются методы, основанные на поглощении излучения в инфракрасной области электромагнитного спектра. Эти данные представлены на геопортале Giovanni. Погрешность алгоритма расчета для сенсора AIRS составляет порядка 15 %.

На краткосрочных ежедневных данных по территории Казахстана на ряде участков их нет. В случае небольших участков в два-три пикселя можно использовать методы интерполяции. Но во многих случаях это большие территории. Поэтому необходимо восстанавливать на этих участках необходимые данные расчетными методами.

В случае длинноволнового излучения можно пренебречь рассеянием и считать, что выполняются условия термодинамического равновесия, при котором основные величины этой системы (температура, давление, объём, энтропия) колеблются возле своих средних значений с небольшими отклонениями при отсутствии сильного внешнего вмешательства. Измеряемое спутниками тепловое излучение, есть сумма всех излучений элементарных слоев атмосферы, характеризующееся функцией ослабления теплового излучения $F_\lambda(p)$, зависящая от давления P и температуры $T(p)$, а также от длины волны λ (или частоты ν), на котором фиксируется излучение, угла визирования ϑ со спутника.

Интенсивность восходящего теплового излучения в атмосфере уравнение переноса в изобарической системе координат можно представить в виде:

$$J_\lambda^\uparrow(p) = B_\lambda[T(p_0)] \cdot F_\lambda(p_0) + \int_{p_0}^0 B_\lambda[T(p)] \frac{dF_\lambda(p)}{dp} dp,$$

где $J_\lambda^\uparrow(p)$ – восходящее тепловое излучение, $B_\lambda[T(p)]$ – функция Планка, $p_0 = 1000 \text{ гПа}$ – давление на земной поверхности. Функция ослабления теплового излучения определяется в виде

$$F_\lambda = e^{-\frac{\tau_\lambda}{\cos\vartheta}},$$

$$\tau_\lambda = \int_{p_0}^p \alpha_\lambda \rho(p) dp,$$

где τ_λ – оптическая толщина атмосферы, α_λ – массовый коэффициент поглощения излучения с размерностью $[\frac{M^2}{кг}]$, $\rho(z)$ – плотность газа $[\frac{кг}{M^3}]$, поглощающее излучение. Измеряемое на спутнике восходящее тепловое излучение (радианс) обозначим $J_\lambda^\uparrow(p_h)$, где p_h – высота спутника.

Для расчета плотности поглощающего газа соотношение перепишем в следующем виде

$$J_{\lambda_{рад}}^\uparrow(p_n) = B_\lambda[T(p_0)] * e^{-\frac{\tau_\lambda}{\cos\vartheta}} - \frac{\alpha_\lambda}{\cos\vartheta} \int_{p_0}^0 B_\lambda[T(p)] e^{-\frac{\tau_\lambda}{\cos\vartheta}} \rho(p) dp,$$

где $J_{\lambda_{рад}}^\uparrow(p_n)$ – интенсивность излучения, измеряемого на платформе спутника с высоты p_n .

Если разбить на элементарные участки Δp высоту с учетом малого значения оптической толщины атмосферы и угла зондирования близким к надиру, то можно получить систему приближенных уравнений для определения содержания газа $\rho(p_i)$, поглощающего излучение на высоте p_i , на разных длинах волн λ_j

$$\sum_{i=1}^n (B_{\lambda_j}[T(p_i)]\Delta p + B_{\lambda_j}[T(p_0)]\rho(p_i)) = \frac{\cos\vartheta}{\alpha_{\lambda_j}} B_{\lambda_j}[T(p_0)] - J_{\lambda_{рад}}^\uparrow(p_n).$$

Эта система уравнений позволяет определять плотность газа, поглощающего излучение. Расчетные подходы и результаты реанализа спутниковых данных MERRA-2 (Model M2TMNXCHM v5.12.4) позволяют получить поля распределения малых составляющих атмосферы по территории Казахстана и провести статистический анализ их распределения.

Вертикальные профили озона по территории Казахстана за 2007 и 2015, 2016, 2017 годы, а также выделенные участки профилей от 150 гПа до 1 гПа на западе, востоке, севере и юге Казахстана за период с сентября 2002 года по май 2018 года представлены на рис. 1. Участки, на которых были восстановлены вертикальные профили содержания озона, были выбраны со следующими координатами: север: 65...71° в.д., 50...56° с.ш.; юг: 66...71° в.д., 42...47° с.ш.; запад: 49...54° в.д., 46...51° с.ш.; восток: 78...83° в.д., 46...51° с.ш. Вертикальные профили озона по территории Казахстана (рис. 1а) за 2015, 2016, 2017 и 2007 годы практически совпадают. По высоте от 1000 гПа до 250 гПа содержание O_3 в среднем изменяется от 30 ppbv до 100 ppbv, от 250 гПа до 100 гПа менее 1000 ppbv, выше 100 гПа идет рост содержания до максимума на высотах 10...7 гПа, затем идет резкое уменьшение содержания почти в два раза на высоте 1 гПа. На графике до высоты 50 гПа западный профиль показывает меньшее содержание, но на высоте 10...7 гПа большее, чем на востоке. Разница

максимальных значений содержания O_3 между западным профилем и восточным достигает 97 ppbv на высоте 7 гПа. Максимум содержания озона находится на высоте 7...10 гПа, где и находится максимум озонного слоя атмосферы. На рис. 2 показано распределение содержания O_3 (ppbv) на высоте 10 гПа по территории Казахстана в январе 2018 года. На рис. 2 отчетливо видно, что в северной части содержание озона меньше, чем на юге. На западе также больше локальных максимумов содержания озона, чем на востоке Казахстана. Внутригодовые распределения общего содержания O_3 в 2016 (а) и 2017 (б) годах по территории Казахстана показаны на рис. 3 (а – 2016 год, б – 2017 год). Наблюдаются ежегодные максимумы в феврале – апреле, в минимумы в октябре – декабре. Многолетние изменения общего содержания O_3 по территории Казахстана за период 2003...2017 годы представлены на рис. 4. Статистический тренд показывает уменьшение общего содержания озона на 1 % за период 2003...2017 годы.

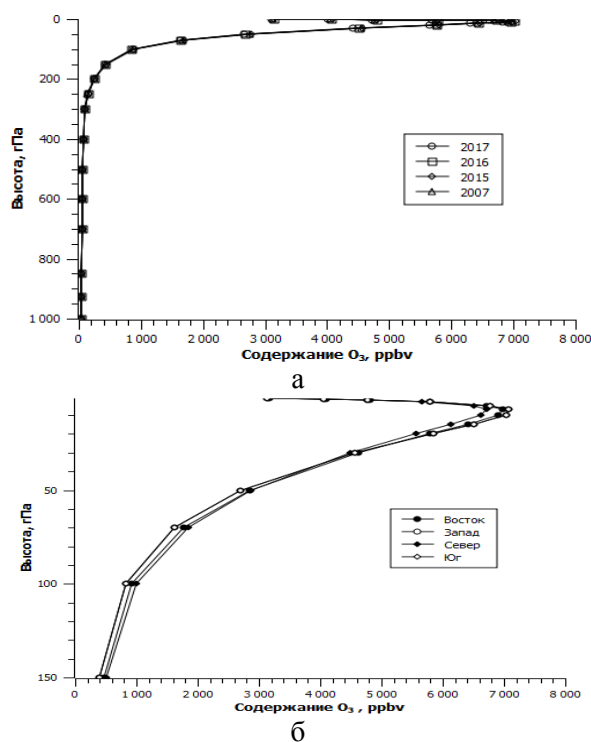


Рис. 1. Вертикальные профили озона по территории Казахстана (а) за 2007 и 2015, 2016, 2017 годы, а также выделенные участки (б) профилей от 150 гПа до 1 гПа на западе, востоке, севере и юге Казахстана.

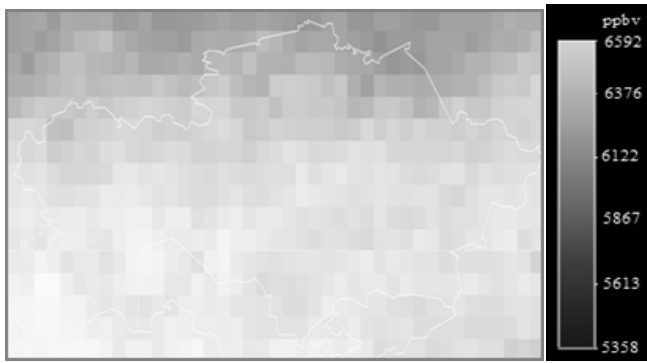


Рис. 2. Распределение содержания O_3 (ppbv) на высоте 10 гПа по территории Казахстана в январе 2018 года.

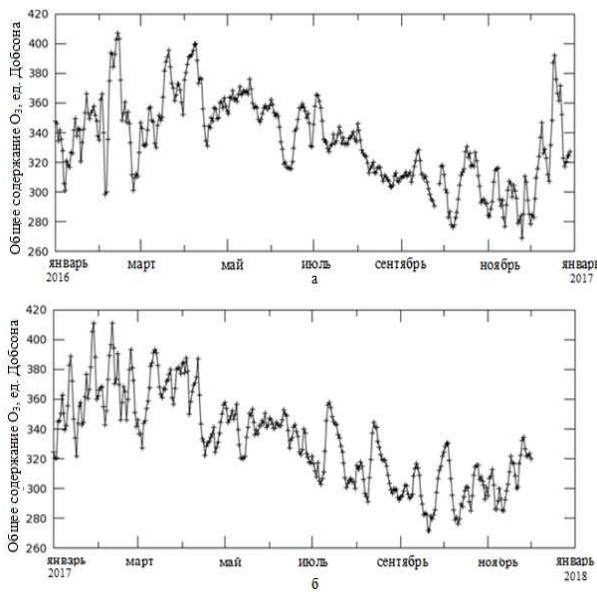


Рис. 3. Внутригодовые распределения общего содержания O_3 в 2016 (а) и 2017 (б) годах по территории Казахстана.

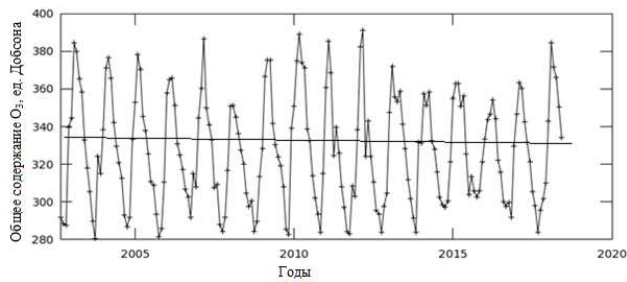


Рис. 4. Изменения общего содержания O_3 по территории Казахстана за период 2003...2017 годы и линия тренда.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Звягинцев А.М., Варгин П.Н. Российские исследования озонового слоя в период 2014-2016 гг. // Труды Гидрометцентра России. – 2017. – Вып. 365. – С. 101-117.
2. Никифорова М.П., Звягинцев А.М., Варгин П.Н., Иванова Н.С., Лукьянов А.Н., Кузнецова И.Н. Аномально низкие уровни общего содержания озона над севером Урала и Сибири в конце января 2016 г. // Оптика атмосферы и океана. – 2017. – Т. 30, – № 1. – С. 12-19.
3. Beer R., Glavich T.A., Rider T.M. Tropospheric emission spectrometer for Earth Observing System's Aura satellite // Applied Optics. – 2001. – V. 40, № 15. – 2356 p.
4. Chevallier F., Morcrette J.J., Chedin A., Cheruy F. TIGR-like atmospheric-profile databases for accurate radiative-flux computation // Quart. J. of the Roy. Met. Soc. – 2000. – V. 126, № 563. – P. 777-785.
5. Jaquinet-Husson N., Scott N.A. and etc. The GEISA spectroscopic database: Current and future archive for Earth and planetary atmosphere studies // Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. – 2008. – V. 109, № 6. – P. 1043-1059.
6. Oktyabrskiy V. The Effect of Greenhouse Ozone on Human // Atmospheric and Climate Sciences, 7, P. 554-557. doi: 10.4236/acs. 2017. 74040.
7. Parkinson C.L. Aqua: an Earth-Observing Satellite mission to examine water and other climate variables // Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions. – 2003. – V. 41, № 2. – P. 173-183.
8. Rothman L.S., Gordon I.E. and etc. The HITRAN molecular spectroscopic database // JQSRT.– 2008. – V. 110. – P. 533-572.
9. Sobrino J.A. Land surface temperature retrieval from thermal infrared data: An assessment in the context of the Surface Processes and Ecosystem Changes Through Response Analysis (SPECTRA) mission // J. Geophys. Res. – 2005. – V. 110. – P. 161-173.

Поступила 10.08.2018

Техн. ғылымд. докторы	А.Х. Ахмеджанов
Физ.-мат. ғылымд. канд.	Н.Д. Ахметов
Техн. ғылымд. канд.	Т.К. Караданов

АТМОСФЕРАДАҒЫ ОЗОННЫҢ МАЗМҰНЫН ТАЛДАУ ДЕРЕКТЕРІ БОЙЫНША ҚАЗАҚСТАН АУМАҒЫНДА СПУТНИКТІ САНДЫҚ

Түйінді сөздер: атмосфера, спектр, озонконцентрациясы, тік профильді, қашықта өлшеу

Атмосферадағы озонның ұстау арқылы алынған озон туралы деректер Қазақстан аумағында спутниктік жәйелер, көрсетіп отырғандай, Қазақстанның батысында 50 гПа аз биіктікке дейін бір халде. Бірақ шоғырлануы көп тимейтін биіктіктерде 10...7 гПа озонның батыста халде. Батыс және Шығыс ррbv мәндерінің арасындағы айырма O_3 ұстау ең жоғары биіктікте 97 7 гПа бейініне жетеді. Талдау көрсеткендей, максимум ақпан-сәуірге қазан-желтоқсанда байқалып отыр, ал жалпы внутригодовых O_3 ұстау бөлудің жыл сайынғы минимумы айлармен. Көп өзгерістерге алынды, ол кезең үшін озонның жалпы мазмұнын көрсетті Қазақстан аумағы бойынша жалпы O_3 ұстау бойынша тренд азаюы 2003...2017 1 %.

Akhmedzhanov A.Kh., Akhmetov N.D., Karadanov T.K.

THE NUMERICAL ANALYSIS OF OZONE CONTENT IN THE ATMOSPHERE ACCORDING TO REMOTE SENSING DATA OF THE TERRITORY OF KAZAKHSTAN

Keywords: atmosphere, spectre, ozone, concentration, vertical profile, remote sensing

The data on ozone in the atmosphere in the territory of Kazakhstan received by means of satellite systems show that up to the height of 50 gp of content of ozone in the west of Kazakhstan it is less, than in the east. But at the heights of 10...7 gp concentration of ozone in the West is more, than in the east. The difference of the maximum values of maintenance of O_3 between the western profile and east reaches 97 ppbv at the height of 7 gp. The analysis of intra annual distributions of the general maintenance of O_3 has shown that annual maxima are observed in February – April, and minimum in October – December months. On long-term changes of the general maintenance of O_3 across the territory of Kazakhstan the trend which has shown reduction of the general content of ozone by 1 % during 2003...2017 has been received