

## Траекторный анализ вариаций озonoактивных компонентов внутри арктического стратосферного вихря с использованием данных реанализа M2-SCREAM

А.Н. Лукьянов<sup>✉</sup>, В.А. Юшков, А.С. Вязанкин\*

Центральная аэрологическая обсерватория  
141707, г. Долгопрудный, Московская обл., ул. Первомайская, 3

Поступила в редакцию 27.07.2023;  
после доработки 21.09.2023;  
принята к печати 02.10.2023

В статье представлены результаты исследования термодинамических и химических процессов внутри стратосферного полярного вихря, приводящим к уменьшению содержания озона в этой области. Рассмотрены зимне-весенние сезоны в Арктике с наиболее сильными стратосферными вихрями и, как следствие, наибольшими потерями озона. Для исследования осредненных по вихрю вариаций озона и озonoактивных компонентов использованы ансамбль обратных траекторий внутри вихря и данные стратосферного реанализа M2-SCREAM, включающие некоторые химические компоненты, влияющие на концентрацию озона. Показано, что рекордное разрушение озона в 2019/2020 г. было обусловлено не только долгоживущим устойчивым стратосферным полярным вихрем, но и более ранней трансформацией хлорных резервуаров в активную форму и более сильной денитрификацией и дегидрацией исследуемых воздушных масс. Предложенный подход может быть использован для анализа динамических и химических процессов в полярной стратосфере для других зимне-весенних периодов, а также для валидации химико-климатических моделей.

*Ключевые слова:* стратосферный полярный вихрь, озон, денитрификация, траекторная модель; stratospheric polar vortex, ozone, denitrification, trajectory model.

### Введение

Несмотря на снижение концентрации озonoразрушающих веществ в стратосфере, в отдельные зимне-весенние периоды наблюдаются значительные потери озона внутри арктического стратосферного вихря. Большие потери были зафиксированы в 2010/2011, 2015/2016 и 2019/2020 г. с максимальными потерями в 2019/2020 г. Это обусловлено тем, что кроме концентрации галогенов на потери озона влияют динамика вихря и его изолированность от средних широт (сила вихря). Внутри сильного вихря происходит радиационное выхолаживание до пороговых значений температуры образования полярных стратосферных облаков (ПСО), на поверхности которых происходят гетерогенные реакции, приводящие к активации галогенов, разрушающих озон. Кроме того, температура стратосферы продолжает понижаться, поэтому вероятность возникновения таких процессов возрастает даже при уменьшающемся содержании озоноразрушающих веществ.

В отличие от Южного полушария для Северного характерна большая межгодовая изменчивость силы вихря и частые его смещения в средние широты. В работе [1] показано, что наблюдаемые в последние годы смещения вихря в сторону Евразии приводят к проникновению обедненных озonom воздушных масс в этот регион. В связи с этим исследования динамической структуры вихря и химических процессов, приводящих к разрушению озона в полярной области, актуальны.

Анализу аномально устойчивого стратосферного полярного вихря с рекордным разрушением озона в Арктике в 2019/2020 г. посвящено множество работ [2–9]. Влияние изменчивости озonoактивных компонентов на поведение озона в этот период оценивалось на основе как модельных расчетов, например [2], так и данных наблюдений, например [3]. В частности, в работе [3] по результатам измерений спутникового прибора MLS представлены осредненные по вихрю вариации азотных и хлорных компонентов, а также озона на различных вертикальных уровнях.

Для исследования динамической структуры полярного вихря и вариаций озона широко используются данные различных реанализов. Недавно разработанный стратосферный реанализ M2-SCREAM [10]

\* Александр Николаевич Лукьянов (lukyanov@caomsk.mipt.ru); Владимир Александрович Юшков (v\_yushkov@mail.ru); Антон Сергеевич Вязанкин (vzvzvzan@mail.ru).

кроме метеопараметров и озона включает в себя также некоторые озonoактивные химические компоненты. Все данные представлены на одной глобальной пространственной сетке и с одним и тем же временным разрешением, что позволяет одновременно анализировать динамические и химические процессы, связанные с разрушением озона, не прибегая к дополнительным базам данных и интерполяции значений параметров из одной сетки в другую.

Поскольку реанализ представляет собой синтез модели и наблюдений, его применение позволяет с большей достоверностью исследовать основные процессы, приводящие к разрушению озона внутри вихря, хотя они в целом уже хорошо изучены. В частности, на озон существенно влияют время и степень активации хлорных и бромных компонентов на поверхности частиц ПСО в начале зимы, а также восстановление хлорных резервуаров  $\text{HCl}$  и  $\text{ClONO}_2$  весной и т.д. На восстановление  $\text{ClONO}_2$  большое влияние оказывают процессы денитрификации (удаление азотных компонентов из воздушной массы вследствие оседания крупных частиц ПСО). При наличии денитрификации восстановление  $\text{ClONO}_2$  замедляется, а уровень активных хлорных компонентов остается высоким, приводя к более продолжительному разрушению озона.

Все эти процессы могут изучаться непосредственно на фиксированной сетке реанализа на изобарических или изоэнтропических поверхностях в различные даты исследуемой зимы. Также широко применяется лагранжев подход, когда эволюция метеопараметров и химических компонентов исследуется внутри движущейся воздушной массы, позволяя оценить изменчивость концентраций компонентов, обусловленную только химической трансформацией.

В настоящей работе по аналогии с [9] применяется именно такой лагранжев подход для определения вариаций атмосферных параметров, осредненных по ансамблю траекторий внутри полярного вихря в течение зимы. Для расчета траекторий в качестве полей метеопараметров используются данные реанализа M2-SCREAM, которые также содержат трехмерные поля  $\text{O}_3$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{HNO}_3$ . Таким образом, этот метод позволяет изучить не только эволюцию озона внутри вихря, но и процессы, определяющие его поведение.

Цель работы — исследование термодинамических и химических процессов, определяющих потери озона в полярной стратосфере, для зим с максимальным химическим разрушением озона в Арктике. Для этого вариации озonoактивных химических компонентов определялись в среднем по ансамблю траекторий, рассчитанных внутри стратосферного полярного вихря. Основой для таких расчетов являлись четырехмерные данные реанализа M2-SCREAM, содержащие информацию как о метеорологических параметрах, так и о концентрации ключевых химических компонентов.

## Модель и данные реанализа

Для расчета ансамбля траекторий внутри вихря применяется траекторная модель [11, 12] с усреднением параметров по этому ансамблю на каждом временном шаге. В отличие от [9] в настоящей работе рассматриваются не прямые, а обратные траектории, инициализированные внутри вихря, с целью исследования только тех воздушных частиц, которые находились внутри вихря. Также для расчета траекторий вместо данных реанализа ERA5 использованы данные M2-SCREAM. Результаты тестовых расчетов для разных лет на основе прямых и обратных траекторий демонстрируют аналогичное поведение параметров, осредненных по ансамблю траекторий внутри вихря, что свидетельствует об устойчивости предлагаемого подхода.

Расчеты проводились для зимне-весенних сезонов 2010/2011, 2015/2016 и 2019/2020 г. с максимальным разрушением озона, а также 2018/2019 г. с ранним потеплением и с незначительными потерями озона — для сравнения. Для разных лет начальные даты траектории выбирались в марте-апреле из соображений наибольшей симметричности вихря относительно полюса в области  $70\text{--}90^\circ$  с.ш. Для инициализации расчетов эта область равномерно засеивалась тысячами воздушных частиц на различных изоэнтропических поверхностях. Для фильтрации частиц, оказывающихся вне вихря, вдоль каждой траектории использовалось пороговое значение потенциальной завихренности в зависимости от вертикального уровня.

Данные стратосферного реанализа M2-SCREAM состоят из метеорологических параметров реанализа MERRA-2 [13], а также ассимилированных глобальных трехмерных полей стратосферного озона ( $\text{O}_3$ ), водяного пара ( $\text{H}_2\text{O}$ ), соляной кислоты ( $\text{HCl}$ ), азотной кислоты ( $\text{HNO}_3$ ) и закиси азота ( $\text{N}_2\text{O}$ ), полученных по данным спутникового прибора MLS версии 4.2. Система ассимиляции CoDAS включает в себя модель общей циркуляции GEOS GCM, совмещенной с модулем стратосферной химии StratChem [14]. Реанализ имеет пространственное разрешение  $0,625^\circ$  по долготе и  $0,5^\circ$  по широте на 72 уровнях и временное разрешение 3 ч, как и MERRA-2; он охватывает период наблюдений MLS с сентября 2004 г. по настоящее время. Более детальное описание данных M2-SCREAM и результаты валидации представлены в работе [10]. В этой работе также указано, что в условиях формирования ПСО в зимний сезон в полярном вихре модельные значения  $\text{HNO}_3$  значительно отличаются от наблюдений, поэтому спутниковые данные  $\text{HNO}_3$  не ассимилируются, а представляются как чисто модельные. Хотя эти ограничения касаются именно области наших исследований, в результатах наших расчетов вариации  $\text{HNO}_3$  также представлены, потому что в среднем по вихрю они согласуются с поведением других компонентов.

## Результаты и обсуждение

Как указывалось выше, обратные траектории для рассматриваемых зимне-весенних периодов инициализировались внутри вихря в марте-апреле на различных высотных уровнях. Прежде всего, для исследования области с максимальным разрушением озона (16–25 км) с учетом неадиабатического оседания воздушных масс внутри вихря обратные траектории инициализировались на изоэнтропическом уровне 435 К.

Результаты расчетов осредненных по ансамблю траекторий вариаций метеорологических параметров для всех зим представлены на рис. 1 (цв. вкладка), а химических компонентов — на рис. 2 (цв. вкладка). Нулевой день 1 ноября соответствует конечной точке обратной траектории. На рис. 1, а, б показано неадиабатическое оседание воздушных масс.

Согласно рис. 1, в зимне-весенний сезон 2018/2019 г. на уровень 16 км воздушные массы опускаются с больших высот по сравнению с другими годами. График скорости ветра (рис. 1, г) демонстрирует более раннее ослабление вихря в 2015/2016 г. и 2018/2019 г., связанное с потеплением. На рис. 1, в видно, что радиационное выхолаживание в 2019/2020 г. началось раньше, чем в другие годы, что привело к более раннему образованию ПСО, гетерогенным реакциям с трансформацией хлорного резервуара HCl в активную форму (рис. 2, а). Такая же трансформация, но с запаздыванием по времени, наблюдается и для других зим, кроме зимы 2018/2019 г. с ранним потеплением. На рис. 2 показаны вариации отношения смеси химических компонентов. Вариации конденсированной  $\text{HNO}_3$  (рис. 2, д) и HCl (рис. 2, а) также демонстрируют более раннее формирование ПСО в сезон 2019/2020 г.

В данных M2-SCREAM газофазная и конденсированная  $\text{HNO}_3$  в условиях ПСО представлены отдельно как чисто модельные параметры (без ассимиляции), характеризующие фазовые превращения азотной кислоты на поверхности частиц ПСО в результате гетерогенных реакций. Как видно из рис. 2, зима 2019/2020 г. характеризуется более значительной денитрификацией по сравнению с другими зимами. Кроме того, график  $\text{H}_2\text{O}$  (рис. 2, в) для этой зимы демонстрирует резкое уменьшение отношения смеси водяного пара, что свидетельствует о фазовых преобразованиях воды при формировании крупных ледяных частиц ПСО. Эти частицы седиментируют, вызывая не только денитрификацию, но и дегидратацию движущихся воздушных масс. Аналогичная картина наблюдается для зимы 2015/2016 г., но более раннее потепление предотвратило дальнейшее разрушение озона (рис. 2, е). Рост  $\text{N}_2\text{O}$  (рис. 2, б) с середины зимы, вероятнее всего, связан с усиливающимся перемешиванием вихревых воздушных масс со среднеширотными.

Аналогичные расчеты ансамбля обратных траекторий были проведены для нижележащих и вышележащих слоев внутри вихря. На рис. 3, 4 (цв. вкладка) представлены результаты для слоя 10–16 км.

На этих высотах температура вдоль траекторий не достигала пороговых значений ПСО, а выраженный рост газофазной и конденсированной  $\text{HNO}_3$  для зим 2015/2016 г. и 2019/2020 г., возможно, вызван ренитрификацией (увеличением отношения смеси  $\text{HNO}_3$ ), обусловленной осадением с верхних уровней и частичным таянием частиц ПСО. Увеличение отношения смеси  $\text{H}_2\text{O}$  в конце каждой зимы свидетельствует об оседании воздушных частиц до уровня гигропаузы, ниже которой в тропосфере влажность сильно возрастает.

Эволюция метеорологических параметров вдоль ансамбля обратных траекторий в слое 25–45 км представлена на рис. 5 (цв. вкладка). Отметим, что в отличие от слоя 16–25 км в вышележащем слое скорость оседания воздушных масс зимой 2018/2019 г. была меньше, чем в другие зимы.

Таким образом, скорость оседания воздушных масс внутри вихря отличается не только в разные годы, но и на различных высотах в течение одной зимы. Как и для слоя 10–16 км, температуры вдоль траекторий были выше пороговых значений ПСО, поэтому вариации концентраций химических компонентов обусловлены только газофазными реакциями.

## Заключение

С помощью траекторной модели и данных химического стратосферного реанализа M2-SCREAM проведен анализ осредненных по вихрю вариаций метеопараметров и концентраций озonoактивных компонентов для зимне-весенних периодов 2010/2011, 2015/2016, 2018/2019 и 2019/2020 г. на различных высотных уровнях. Показано, что в 2019/2020 г. на высотах 16–25 км были созданы условия для рекордного разрушения озона, аналогичные тем, что возникают в антарктическом вихре. Кроме низких температур и более ранней трансформации хлорных резервуаров в активную форму также наблюдались процессы денитрификации, которые препятствовали восстановлению хлорных резервуаров и способствовали продолжительному разрушению озона. Рост концентрации азотной кислоты в нижележащих слоях для 2015/2016 и 2019/2020 г., возможно, вызван ренитрификацией, обусловленной осадением частиц полярных стратосферных облаков с верхних уровней.

Также показано, что скорость неадиабатического оседания воздушных масс в среднем по ансамблю траекторий внутри вихря различается не только в разные зимы, но и на разных высотах в течение одного сезона.

Представленный метод диагностики динамических и химических процессов внутри вихря с использованием ансамбля траекторий может применяться как для анализа прошедших зим, так и для валидации химических климатических моделей с целью корректного прогнозирования будущего состояния полярной стратосферы.

**Благодарности.** Авторы благодарны разработчикам реанализа M2-SCREAM за свободно предоставляемые данные.

**Финансирование.** Работа выполнена в рамках научно-исследовательской темы 2.9 Росгидромета.

## Список литературы

1. Zhang J., Tian W., Xie F., Chipperfield M.P., Feng W., Son S.-W., Abraham N.L., Archibald A.T., Bekki S., Butchart N., Deushi M., Dhomse S., Han Yu., Jöckel P., Kinnison Douglas, Kirner O., Michou M., Morgenstern O., O'Connor F.M., Pitari G., Plummer D.A., Revell L.E., Rozanov E., Visionsi D., Wang W., Zeng G. Stratospheric ozone loss over the Eurasian continent induced by the polar vortex shift // *Nat. Commun.* 2018. V. 9. P. 206. DOI: 10.1038/s41467-017-02565-2.
2. Wohltmann I., von der Gathen P., Lehmann R., Deckelmann H., Manney G.L., Davies J., Tarasick D., Jepsen N., Kivi R., Lyall N., Rex M. Chemical evolution of the exceptional Arctic stratospheric winter 2019/2020 compared to previous Arctic and Antarctic winters // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2021. V. 126. P. e2020JD034356. DOI: 10.1029/2020JD034356.
3. Manney G.L., Livesey N.J., Santee M.L., Froidevaux L., Lambert A., Lawrence Z.D., Millan L., Neu J.L., Read W.G., Schwartz M.J., Fuller R. Record-low Arctic stratospheric ozone in 2020: MLS observations of chemical processes and comparisons with previous extreme winters // *Geophys. Res. Lett.* 2020. V. 47. P. e2020GL089063. DOI: 10.1029/2020GL089063.
4. Wohltmann I., von der Gathen P., Lehmann R., Maturrilli M., Deckelmann H., Manney G.L., Davies J., Tarasick D., Jepsen N., Kivi R., Lyall N., Rex M. Near-complete local reduction of Arctic stratospheric ozone by severe chemical loss in spring 2020 // *Geophys. Res. Lett.* 2020. V. 47. P. e2020GL089547. DOI: 10.1029/2020GL089547.
5. Dameris M., Loyola D.G., Nützel M., Coldewey-Egbers M., Lerot C., Romahn F., van Roozendaal M. Record low ozone values over the Arctic in boreal spring 2020 // *Atmos. Chem. Phys.* 2021. V. 21. P. 617–633. DOI: 10.5194/acp-21-617-2021.
6. Inness A., Chabrillat S., Flemming J., Huijnen V., Langenrock B., Nicolas J., Polichtchouk I., Razinger M. Exceptionally low Arctic stratospheric ozone in spring 2020 as seen in the CAMS reanalysis // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2020. V. 125. P. e2020JD033563. DOI: 10.1029/2020JD033563.
7. Kuttippurath J., Feng W., Müller R., Kumar P., Raj S., Gopikrishnan G.P., Roy R. Exceptional loss in ozone in the Arctic winter/spring of 2019/2020 // *Atmos. Chem. Phys.* 2021. V. 21. P. 14019–14037. DOI: 10.5194/acp-21-14019-2021.
8. Manney G.L., Millán L.F., Santee M.L., Wargan K., Lambert A., Neu J.L., Werner F., Lawrence Z.D., Schwartz M.J., Livesey N.J., Read W.G. Signatures of anomalous transport in the 2019/2020 Arctic stratospheric polar vortex // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2022. V. 127. P. 2022JD037407. DOI: 10.1029/2022JD037407.
9. Лукьянов А.Н., Варгин П.Н., Юшков В.А. Исследование с помощью лагранжевых методов аномально устойчивого арктического стратосферного вихря, наблюдавшегося зимой 2019–2020 гг. // *Изв. РАН. Физика атмосф. и океана.* 2021. Т. 57, № 3. С. 278–285.
10. Wargan K., Weir B., Manney G.L., Cohn S.E., Knowland K.E., Wales P.A., Livesey N.J. M2-SCREAM: A stratospheric composition reanalysis of Aura MLS data with MERRA-2 transport // *Earth Space Sci.* 2023. V. 10. P. e2022EA002632. DOI: 10.1029/2022EA002632.
11. Lukyanov A., Nakane H., Yushkov V. Lagrangian estimation of ozone loss in the core and edge region of the Arctic polar vortex 1995/1995: Model results and observations // *J. Atmos. Chem.* 2003. V. 44, N 2. P. 191–210.
12. Лукьянов А.Н., Ганьшин А.В., Юшков В.А., Вязанкин А.С. Траекторное моделирование средней атмосферы // *Метеорол. и гидрол.* 2021. № 9. С. 95–104.
13. Gelaro R., McCarty W., Suárez M.J., Todling R., Molod A., Takacs L., Randles C.A., Darmenov A., Bosilovich M.G., Reichle R., Wargan K., Coy L., Cullather R., Draper C., Akella S., Buchard V., Conaty A., da Silva A.M., Gu W., Kim G.-K., Koster R., Lucchesi R., Merkova D., Nielsen J.E., Partyka G., Pawson S., Putman W., Rienecker M., Schubert S.D., Sienkiewicz M., Zhao B. The Modern-Era Retrospective Analysis for research and applications, version 2 (MERRA-2) // *J. Clim.* 2017. V. 30, N 14. P. 5419–5454. DOI: 10.1175/JCLI-D-16-0758.1.
14. Wargan K., Weir B., Manney G.L., Cohn S.E., Livesey N.J. The anomalous 2019 Antarctic ozone hole in the GEOS Constituent Data Assimilation System with MLS observations // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2020. V. 125, N 18. P. e2020JD033335. DOI: 10.1029/2020JD033335.

**A.N. Lukyanov, V.A. Yushkov, A.S. Vyazankin. Trajectory analysis of variations in ozone-active components inside the Arctic stratospheric vortex using M2-SCREAM reanalysis data.**

The paper is devoted to thermodynamic and chemical processes inside the stratospheric polar vortex, leading to a decrease in ozone content in this region. The winter-spring seasons in the Arctic with the strongest stratospheric vortices and, as a result, the greatest ozone losses are considered. To study the ozone variations and ozone-active components averaged over the vortex, we used an ensemble of backward trajectories inside the vortex and M2-SCREAM stratospheric reanalysis data, which includes some chemical components that affect the ozone concentration. It is shown that the record ozone depletion in the winter of 2020 was due to not only the long-lived stable stratospheric polar vortex, but also the earlier transformation of chlorine reservoirs into the active form and stronger denitrification and dehydration of air masses. The proposed approach can be used to analyze processes in the polar stratosphere over the past winters, as well as to validate chemical-climate models.

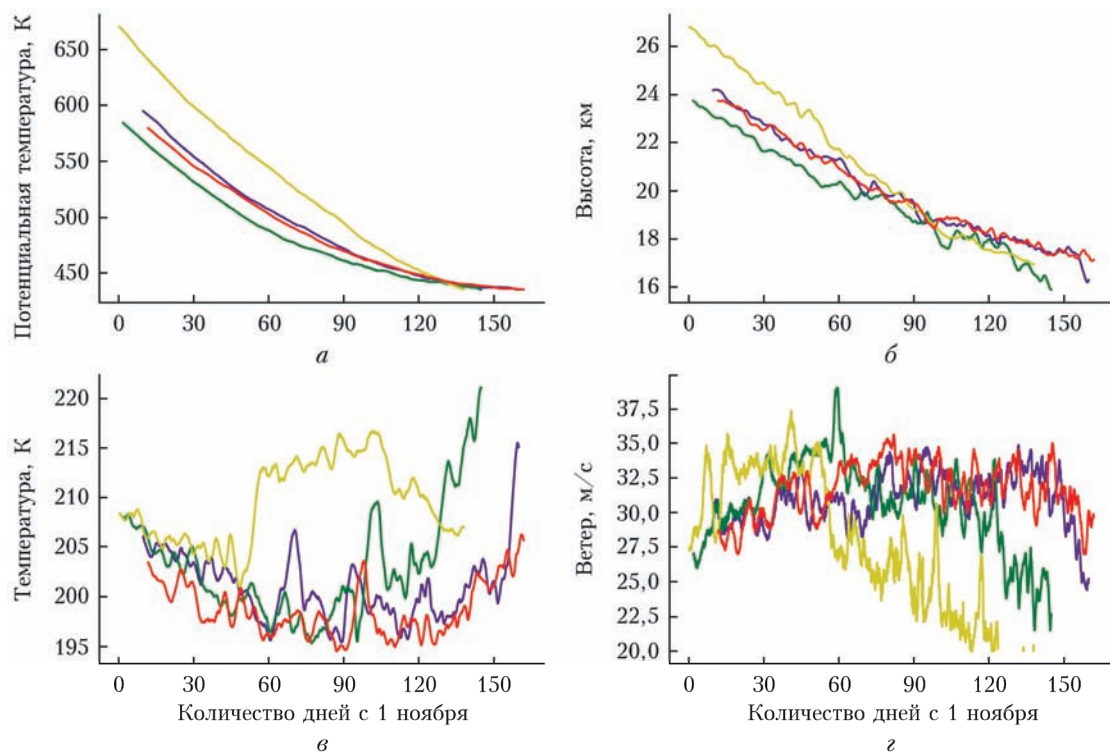


Рис. 1. Вариации потенциальной температуры (*а*), высоты (*б*), температуры (*в*), скорости ветра (*г*) в слое 16–25 км, осредненных по ансамблю траекторий: синие кривые — 2010/2011 г., зеленые — 2015/2016 г., желтые — 2018/2019 г., красные — 2019/2020 г.

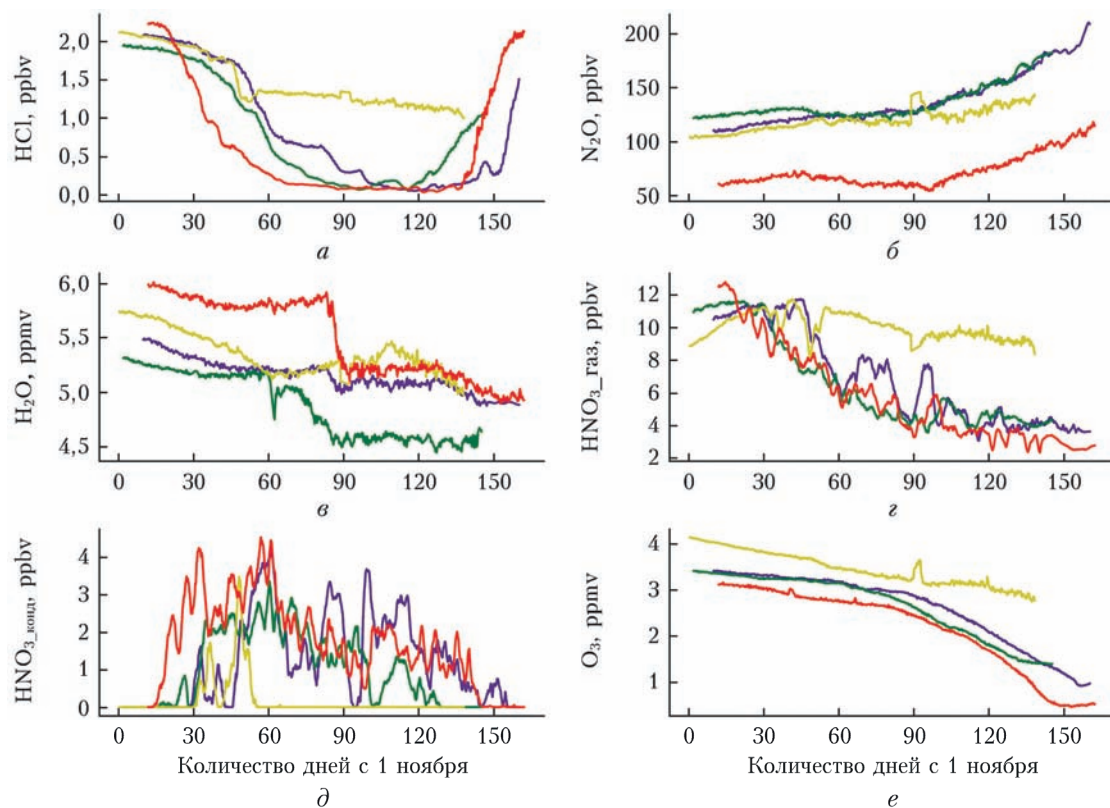


Рис. 2. Вариации отношения смеси HCl (*а*),  $N_2O$  (*б*),  $H_2O$  (*в*),  $HNO_3_{\text{газ}}$  (*г*)  $HNO_3_{\text{конд}}$  (*д*),  $O_3$  (*е*) в слое 16–25 км, осредненных по ансамблю траекторий: синие кривые — 2010/2011 г., зеленые — 2015/2016 г., желтые — 2018/2019 г., красные — 2019/2020 г.

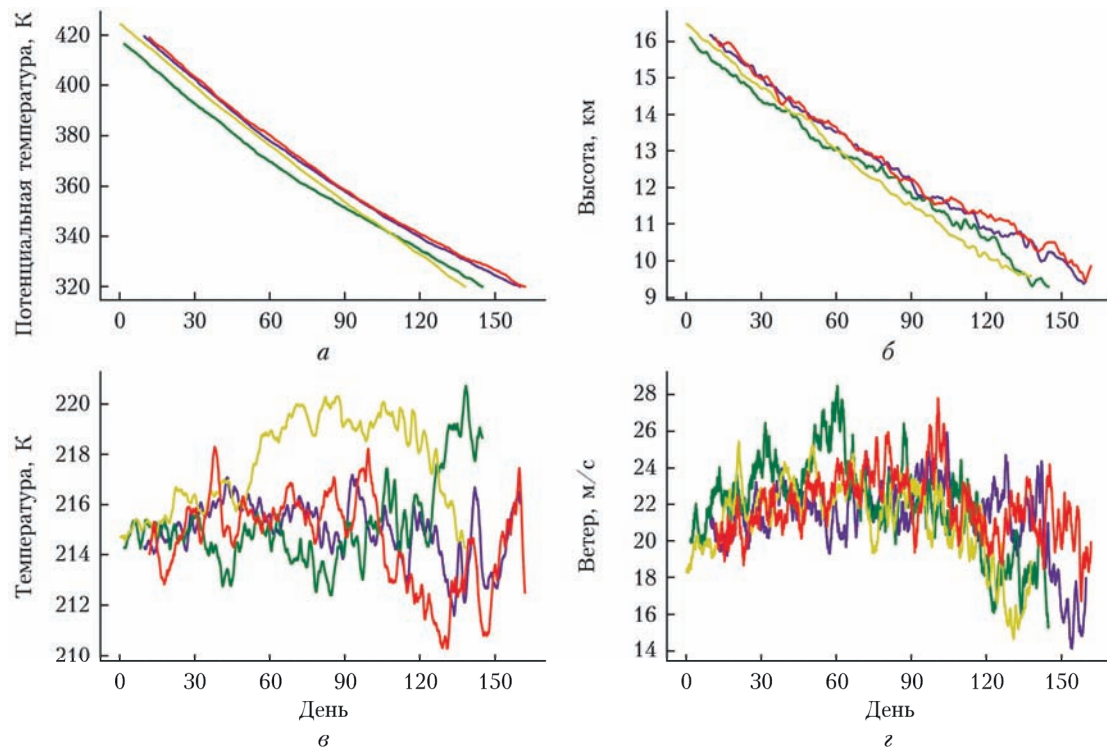


Рис. 3. То же, что и на рис. 1, но для высотного слоя 10–16 км

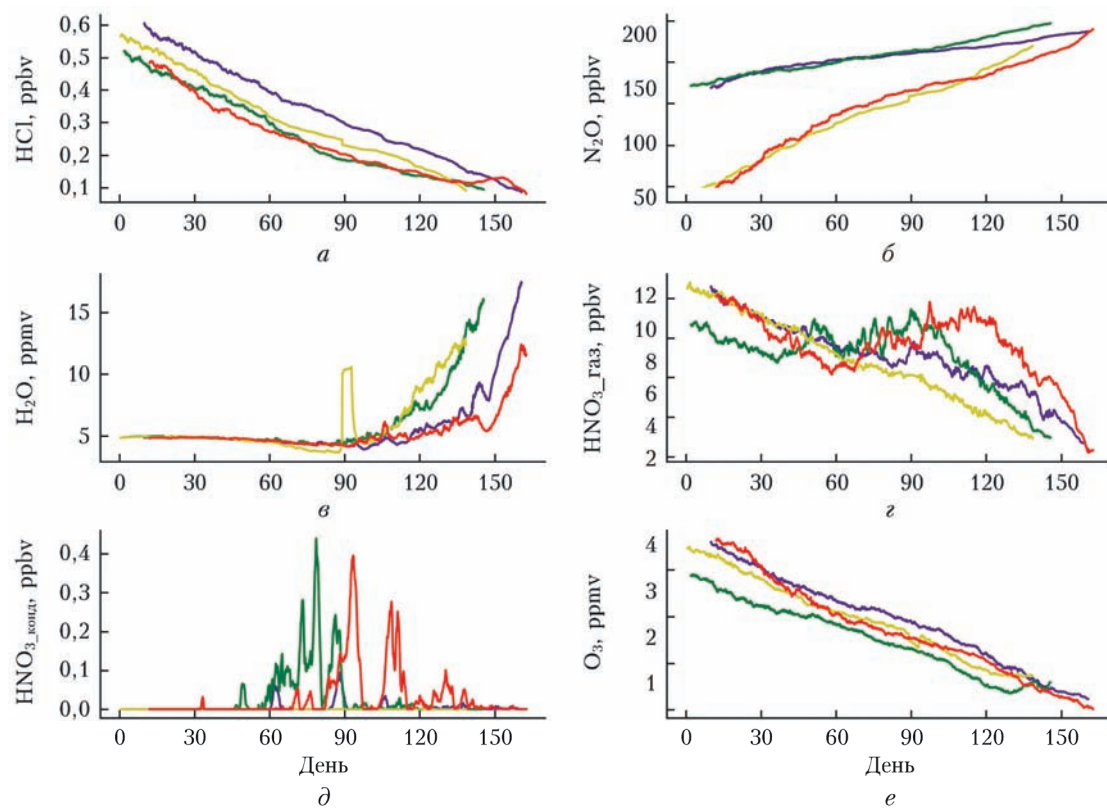


Рис. 4. То же, что и на рис. 2, но для высотного слоя 10–16 км

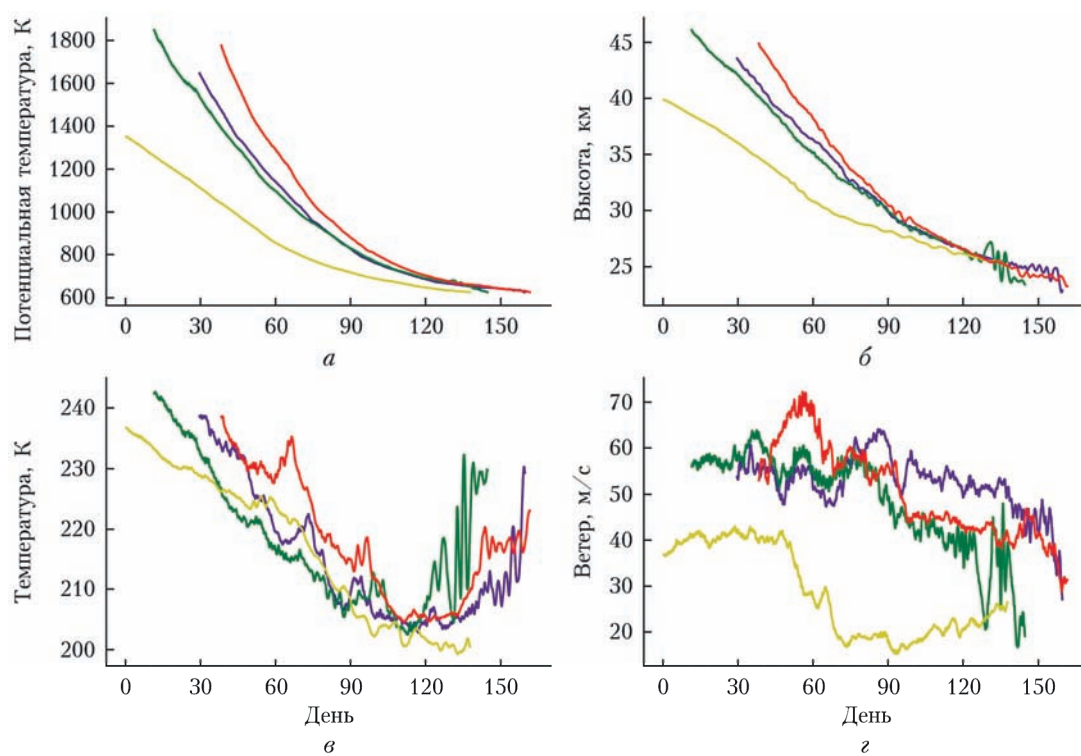


Рис. 5. То же, что и на рис. 1, но для высотного слоя 25–45 км