

УДК 551.510.413.2

## ИЗМЕНЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ОЗОНА В АТМОСФЕРЕ НАД НИЖНИМ НОВГОРОДОМ: СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАДИОМЕТРИЧЕСКИХ И СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ, РЕАНАЛИЗА И ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

*Т. С. Ермакова*<sup>1,2</sup>, *С. П. Смышляев*<sup>2,1</sup>, *М. Ю. Куликов*<sup>1\*</sup>, *М. В. Беликович*<sup>1</sup>,  
*А. А. Красильников*<sup>1</sup>, *В. Г. Рыскин*<sup>1</sup>, *А. А. Нечаев*<sup>1</sup>, *А. М. Фейгин*

<sup>1</sup> Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород;

<sup>2</sup> Российский государственный гидрометеорологический университет, г. Санкт-Петербург, Россия

В работе представлено сравнение результатов наблюдений и численного моделирования изменчивости содержания озона в атмосфере над Нижним Новгородом для зим 2015 и 2016 годов. Были использованы данные локальных наземных измерений, данные реанализа MERRA, спутниковые данные (прибор SBUV), а также данные численного моделирования. Анализ результатов демонстрирует сходную картину изменчивости содержания озона для всех источников данных. Наблюдается стабильный высотный максимум в средней стратосфере с кратковременными периодами увеличения концентрации озона. Использование данных численного моделирования позволило оценить влияние фотохимических и динамических факторов на наблюдаемую изменчивость содержания озона в зимние месяцы в атмосфере над Нижним Новгородом.

### ВВЕДЕНИЕ

Глобальный мониторинг атмосферного содержания озона является важной составляющей частью контроля изменчивости состояния окружающей среды. Озоновый слой в стратосфере поглощает губительное ультрафиолетовое излучение, в то время как в тропосфере озон — загрязнитель воздуха, оказывающий влияние на здоровье человека и экосистемы [1]. Озон также является одним из основных газов, определяющих окислительную способность тропосферы. Сезонная изменчивость общего содержания озона имеет свои, характерные для разных регионов, особенности, такие как зимне-весенний максимум в полярных и средних широтах Северного полушария, весенние озоновые дыры в Антарктике, слабая сезонная изменчивость в тропиках и другие. При этом в Арктике в зимне-весеннее время эпизодически наблюдаются пониженные относительно сезонного максимума значения содержания озона, которые в последнее время стали проявляться чаще. В частности, аномально низкие значения содержания озона наблюдались в Арктике весной 2011 года, зимой 2015–2016 годов пониженное содержание озона наблюдалось в начале зимы, а в весенний период озоновые аномалии не регистрировались.

Арктические озоновые аномалии, с одной стороны, имеют схожесть с антарктическими озоновыми дырами, а с другой — имеют свои особенности. Кроме того, формирование озоновых аномалий в Арктике влияет на прилегающие средние широты, поэтому особый интерес представляет мониторинг содержания озона в подверженных влиянию арктических потоков воздуха средних широтах. Сочетание локальных измерений содержания озона с численным моделированием позволяет идентифицировать влияющие на содержание озона факторы и исследовать относительную роль физических и химических процессов в наблюдаемой изменчивости содержания озона.

---

\* kulm@ipfran.ru

В последнее время широкое распространение получили спутниковые методы измерения содержания атмосферного озона, позволяющие осуществлять близкий к глобальному мониторинг его изменчивости [2]. Спутниковые измерения обширны и содержательны, но в связи с трудностью разделения тропосферной и стратосферной составляющих озона по-прежнему не могут считаться идеальными. Между тем наземные методы измерения содержания озона являются важным источником информации об изменении параметров озоносферы на сравнительно небольших пространственно-временных масштабах, не разрешаемых спутниковыми методами. Как спутниковые, так и наземные измерения содержания озона в тропосфере и стратосфере используются для верификации результатов моделирования химического состава атмосферы и её общей циркуляции. Совместный анализ данных спутниковых и наземных измерений и результатов численного моделирования позволяет выделить глобальные и региональные особенности изменения содержания озона и определить основные факторы, влияющие на особенности его пространственно-временного распределения.

Содержание атмосферного озона измеряется как дистанционными, так и контактными методами. Контактные методики включают в себя оптические, химические и электрохимические способы измерений локального содержания озона. Наиболее распространёнными среди контактных методов являются озонзондовые методы, которые позволяют измерять вертикальный профиль содержания озона с достаточно высоким разрешением (около 100 м) и точностью  $\pm(5\div 10)\%$  [3–5]. Зондирования проводятся на разных широтах по всему Земному шару. Данные собираются в Северном полушарии во Всемирном центре данных по озону и ультрафиолетовой радиации (World Ozone and Ultraviolet Data Centre). Сеть дополнительных озоновых зондов в Южном полушарии (the Southern Hemisphere Additional Ozonesondes) дополняет картину [3, 4, 6, 7]. Однако покрытие всё равно остаётся фрагментарным, что делает невозможным создание глобальной картины распределения озона. Кроме того, зонды позволяют измерять концентрацию озона только в тропосфере и нижней половине стратосферы, тогда как значительное количество озона находится выше.

Дистанционное зондирование основывается на определении поглощательной способности атмосферы. Путём измерения спектра излучения от естественного (Солнце) или искусственного источника после того, как оно прошло через слой атмосферного озона, можно определить содержание озона в толще атмосферы. Большинство дистанционных методов в качестве источника света используют солнечное излучение, что ограничивает их использование периодом солнечной освещённости. Между тем уже довольно продолжительное время интенсивно развиваются методы измерения содержания озона, основанные на регистрации радиоволнового излучения его молекул и не зависящие от условий солнечной освещённости. В данной работе приводятся результаты локальных измерений профиля отношения смеси стратосферного озона в Нижнем Новгороде с помощью спектрометрического комплекса [8, 9], регистрирующего собственное излучение озона, которые сравниваются с результатами спутниковых измерений, а также данными реанализа и численного моделирования.

Периодически наблюдаемые зимние и весенние аномалии содержания озона в Арктике и прилегающих средних широтах могут вызываться как химическими процессами, в чём-то сходными с процессами формирования антарктических озоновых дыр, так и специфическими динамическими условиями в Арктике и Субарктике. С точки зрения теоретического анализа значимости химических и динамических факторов в особенностях изменения содержания озона интересным представляется изучение двух последовательных зим, в которые отмечались отличия в содержании озона, а долгопериодные факторы влияния, такие как общее содержание хлорных и бромных газов в стратосфере, в значительной степени определяющих фотохимическое разрушение стратосферного озона, мало отличались. Наличие измерений содержания озона в Нижнем Новгороде

в течение зимних месяцев 2015 и 2016 годов в этом смысле представляет исследовательский интерес, т. к. зимой 2015–2016 годов в значительной части Арктики и Субарктики наблюдались аномально низкие значения содержания озона, а зимой 2014–2015 годов таких аномалий не было. Целью данной работы является анализ локальных измерений содержания озона в районе Нижнего Новгорода в январе–феврале 2015 и 2016 годов и сравнение их со спутниковыми данными и результатами численного моделирования с целью определения значимости химических и динамических факторов в наблюдаемой его изменчивости.

## 1. МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ОЗОНА В НИЖНЕМ НОВГОРОДЕ

### 1.1. Наземный мобильный спектрометрический комплекс для непрерывного мониторинга структуры озонного слоя Земли

Измерения пространственно-временной эволюции концентрации озона на высотах средней атмосферы проводились в ИПФ РАН (Нижний Новгород) с помощью мобильного полностью автоматизированного наземного спектрометрического комплекса [8, 9], предназначенного для непрерывного мониторинга структуры озонного слоя Земли по спектрам яркостной температуры атмосферы в линии собственного излучения озона. Данный прибор основан на классическом супергетеродинном принципе приёма и анализа излучения миллиметрового диапазона длин волн и включает в себя антенну, систему калибровки (модулятор-калибратор), приёмник, цифровой анализатор спектра и систему управления, сбора и обработки данных на базе ноутбука. Основные характеристики: центральная частота 110,83604 ГГц, полоса анализа 0,8 ГГц, спектральное разрешение 61 кГц, число спектральных каналов 16 384, шумовая температура 1 450 К, суммарная масса менее 15 кг, полное энергопотребление менее 100 Вт. Отличительной особенностью озонметра является уникальная система калибровки измеряемого сигнала по внутреннему электрически управляемому эталону, исключающему постоянное использование жидкого азота. Применение статистических (байесовых) алгоритмов к решению некорректных обратных задач [10] позволяет по каждому полученному спектру (с типичным временем накопления 15÷30 мин) восстанавливать с контролируемой точностью вертикальный профиль концентрации озона в диапазоне высот от 15 до 75 км. Вертикальное разрешение составляет порядка 5÷8 км и понижается с увеличением высоты (оценка соответствует характерным ширинам сглаживающих ядер [11]). Неопределённость также зависит от высоты и составляет примерно 6% на 35 км, 10% на 50 км и 30% на 75 км. Необходимо отметить, что создание данного прибора вошло в число важнейших результатов работы РАН за 2015 год [12].

### 1.2. Спутниковый метод на основе анализа данных прибора SBUV

Систематические измерения общего содержания озона и его профиля из космоса начались с запуском 4 апреля 1970 года спутника «Нимбус-4», на котором был установлен инструмент ВУВ (Backscattered UltraViolet). С тех пор девять дополнительных инструментов различных модификаций запускались на спутниках Национального управления по воздухоплаванию и исследованию космического пространства (National Aeronautics and Space Administration, NASA) и Национального управления океанических и атмосферных исследований (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) [13–15]. Прибор SBUV (Solar Backscatter UltraViolet) на борту спутника «Нимбус-7» появился в октябре 1978 года. Данные, полученные при использовании этого прибора, в настоящее время охватывают более 40 лет. За период с 1978 по 2012 год приборы

Таблица 1. Космические носители аппаратуры для мониторинга озоносферы

Спутник	Высота орбиты, км	Наклонение, градусы	Период обращения, мин	Прибор для измерения концентрации озона	Период работы прибора, годы
NIMBUS-7	955	99,1	104,15	SBUV	1978–1990
NOAA-9	850	98,7	101,7	SBUV/2	1985–1998
NOAA-11	841	98,9	101,8	SBUV/2	1989–2001
NOAA-14	844	99,1	101,9	SBUV/2	1995–2006
NOAA-16	849	98,8	102,1	SBUV/2	2000–2010
NOAA-17	813	98,6	101,2	SBUV/2	2002–2010
NOAA-18	811	98,7	101,2	SBUV/2	2005–2010
NOAA-19	870	98,7	102,14	SBUV/2	2009–2012

SBUV и SBUV/2 (прибор 2-го поколения SBUV) были установлены на восьми космических аппаратах, орбитальные параметры которых приведены в табл. 1. Все восемь аппаратов находились на солнечно-синхронных орбитах.

Космические носители аппаратуры типа SBUV пересекали экватор примерно 14 раз в сутки в одно и то же местное среднее солнечное время, т. е. по долготе точки прохода находились друг от друга на угловом расстоянии около  $26^\circ$  [16]. Измерения приборами SBUV (SBUV/2) проводятся вблизи местного вертикала в пределах углов  $\pm 11,3^\circ$ . Пространственное разрешение SBUV составляет  $180 \times 180 \text{ км}^2$ , разрешение SBUV/2 равно  $168 \times 168 \text{ км}^2$ . Наблюдения охватывают географическую область от  $81^\circ$  с. ш. до  $81^\circ$  ю. ш. Вертикальное распределение  $\text{O}_3$  определяется в 21 вертикальном диапазоне от 1013,25 до 0,101 мб с переменным шагом с точностью до 5% [2], глобальное общее содержание озона — до 1%. При этом, как показано в работе [17], наиболее качественную информацию об озоносфере прибор SBUV позволяет получать для верхней стратосферы (выше 25 км), хотя и для нижней стратосферы качество данных SBUV сравнимо с качеством наземных измерений.

### 1.3. Данные реанализа MERRA

Данные о глобальном состоянии атмосферы MERRA (Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications) [18] охватывают весь период времени от получения первых глобальных результатов дистанционного зондирования в 1979 году и по настоящее время. Массив данных реанализа MERRA интегрировал в себя результаты натуральных измерений из различных источников системы данных GEOS-5, которая включает в себя множество современных инструментов наблюдения, как наземных, так и космических (TIMED, CRISTA, LIMS, UARS, MLS TOVS, ATOVS, EOS-Aqua, COSMIC, CHAMP, SABER). Большое число параметров реанализа, интегрированных в массив MERRA, обеспечивает хорошую базу для изучения изменчивости климата. Данные MERRA схожи с другими глобальными массивами реанализа, но имеют несколько ключевых преимуществ, такие как более высокое, чем у аналогов, разрешение по времени и пространству. Данные ассимилированы на регулярной горизонтальной сетке с разрешением  $1,25^\circ \times 1,25^\circ$  по широте и долготе. Массив приведён к изобарической системе координат по вертикали с разрешением в 42 уровня. Верхняя граница расположена на уровне 0,1 гПа. Разрешение по времени составляет 3 ч. Используются следующие источники данных: 1) NCEP (National Weather Service National Centers for Environmental Prediction) NOAA, 2) UCAR (the University Corporation

for Atmospheric Research), 3) GSFC (Goddard Space Flight Center) NASA, 4) SBUV, 5) JPL (Jet Propulsion Laboratory) NASA.

#### 1.4. Численное моделирование

Теоретические расчёты изменения содержания озона в атмосфере над Нижним Новгородом осуществлялись с помощью численной модели состава нижней и средней атмосферы (МНСА) [19]. Модель была создана на основе химико-климатической модели Института вычислительной математики РАН и РГГМУ [20], которая ранее успешно применялась для решения задач, связанных с взаимодействием физических и химических процессов в атмосфере [19, 21–23]. В отличие от химико-климатической модели, в МНСА поля ветра, температуры, влажности и давления не рассчитываются, а задаются по данным реанализа, в качестве которых в данном исследовании брались данные MERRA. При численном моделировании не используются результаты ассимиляции измерений содержания озона MERRA, которые описаны выше, а содержание озона рассчитывается на основе оценки одновременного влияния фотохимических и динамических процессов. Такой подход позволяет оценить вклад различных факторов в изменчивость содержания озона.

Модель состава нижней и средней атмосферы охватывает высотный диапазон  $0 \div 60$  км и позволяет рассчитывать изменчивость полей 74 малых газовых составляющих (МГС) атмосферы, взаимодействующих в 174 химических реакциях и 46 реакциях фотодиссоциации [24]. Разрешение модели составляет  $4^\circ$  по широте и  $5^\circ$  по долготе, с переменным шагом по высоте от земной поверхности до 60 км (31 вертикальный уровень). Учёт влияния изменчивости спектральных потоков солнечной радиации на химию атмосферы осуществляется с помощью расчёта скоростей фотодиссоциации [25] на основании задания изменчивости спектральных потоков солнечной радиации [26] с учётом влияния циклов солнечной активности [23]. Среднесуточные поля горизонтального ветра, влажности, поверхностного давления и температуры из реанализа MERRA интерполируются на модельную сетку и ассимилируются моделью в начале каждого дня. Поле вертикального ветра рассчитывается по интерполированным данным уже на сетке модели для того, чтобы обеспечить выполнение закона сохранения массы, который может нарушиться при интерполяции данных реанализа на сетку модели.

## 2. СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ, РЕАНАЛИЗА И ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

На рис. 1 и 2 представлены результаты измерений, проведённых в районе Нижнего Новгорода в январе (рис. 1а, 2а) и феврале (рис. 1б, 2б) 2015 и 2016 годов соответственно с использованием мобильного полностью автоматизированного наземного спектрометрического комплекса. Для этих же месяцев и для этого же района построено содержание озона по данным модели МНСА (рис. 1в, 2в — январь, 1г, 2г — февраль), по спутниковым данным (рис. 1д, 2д — январь и 1е, 2е — февраль) и по данным MERRA (рис. 1ж, 2ж — январь и 1з, 2з — февраль). Содержание (отношение смеси) озона выражено числом молекул, приходящихся на миллион молекул воздуха (parts per million by volume, ppmv).

В конце второй декады января 2015 года в диапазоне высот  $25 \div 40$  км наблюдалось повышенное содержание озона, 8 ppmv (см. рис. 1в) и 6,5 ppmv (рис. 1д и ж), однако спектрометрический комплекс данный максимум не фиксировал (см. рис. 1а). В январе 2016 года снова отмечались два максимума во второй декаде месяца: здесь все методики показывали одинаковые концентрации озона, а также соответствующие этим максимумам высоты и моменты времени.

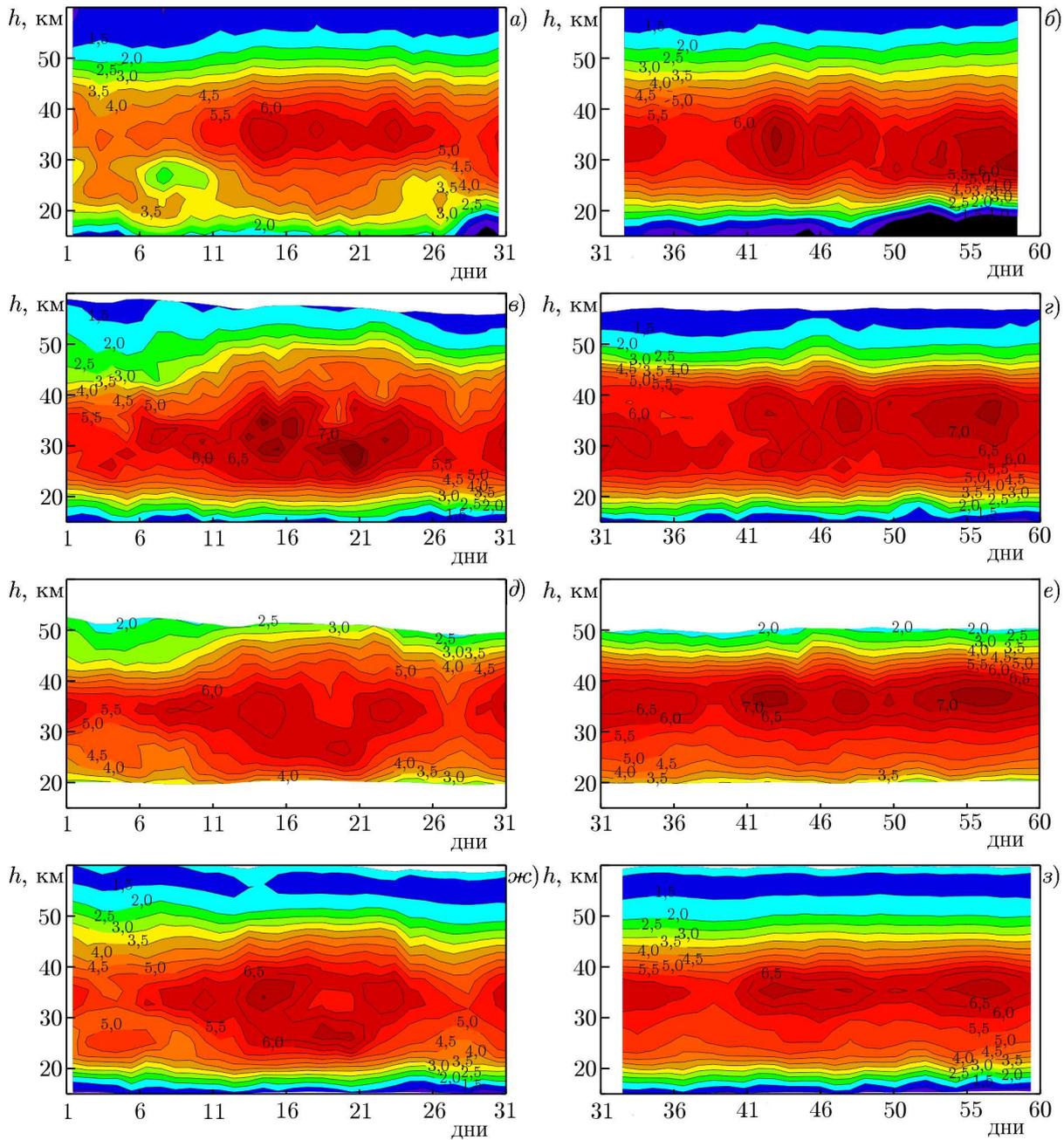


Рис. 1. Пространственно-временная эволюция отношения смеси озона  $N$  [ppmv] в районе Нижнего Новгорода, полученные для января (левый столбец) и февраля (правый столбец) 2015 года с помощью мобильного полностью автоматизированного наземного спектрометрического комплекса (а, б); по результатам моделирования (в, е); инструментом SBUV (д, е); по данным MERRA (ж, з). Расстояние между изолиниями составляет 0,5 ppmv,  $h$  — высота над поверхностью Земли

В середине февраля как 2015, так и 2016 года также отмечалось повышение концентрации озона на высоте 35 км. Спектрометрический комплекс для обоих месяцев фиксировал содержание озона 8 ppmv (рис. 1б и 2б), в то время как другие методики показывали не больше 7 ppmv для февраля 2016 года и 7,0÷7,5 ppmv для февраля 2015 года.

Следует отметить, что результаты измерений с использованием спектрометрического

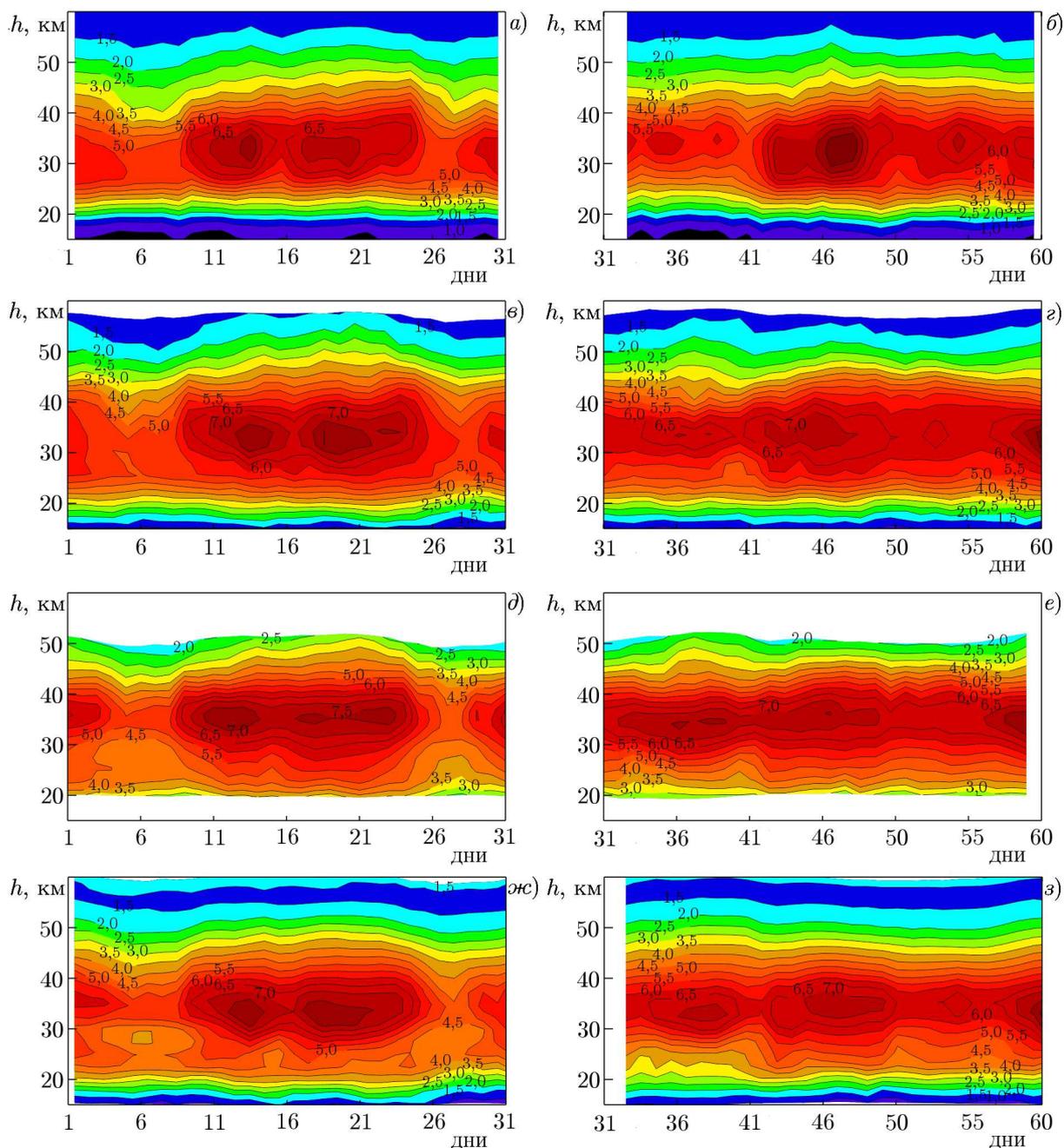


Рис. 2. Пространственно-временная эволюция отношения смеси озона  $N$  [ppmv] в районе Нижнего Новгорода, полученные для января (левый столбец) и февраля (правый столбец) 2016 года с помощью мобильного полностью автоматизированного наземного спектрометрического комплекса (а, б); по результатам моделирования (в, г); инструментом SBUV (д, е); по данным MERRA (ж, з). Расстояние между изолиниями составляет 0,5 ppmv

комплекса в целом хорошо согласуются со спутниковыми измерениями, данными реанализа и численного моделирования. Время и высота максимального содержания озона в анализируемые месяцы близки для всех типов данных и моделирования. Наличие же небольшой переоценки/недооценки концентрации озона тем или другим методом, скорее всего, связано с разными метеорологическими условиями, конечностью времени пролёта спутника над исследуемой тер-

риторией и малостью частоты проводимых измерений в сутки, а также дополнительной ассимиляцией данных в случае массива MERRA. Некоторые количественные расхождения, которые существуют между всеми рассматриваемыми в данной работе методиками оценки содержания озона, помимо упоминавшихся ранее причин, могут быть связаны с разным пространственным разрешением этих методов. Если спектрометрические данные получены локально, непосредственно в Нижнем Новгороде, то остальные результаты найдены путём интерполяции из узлов используемых сеток. Таким образом, эти результаты представляют собой площадные оценки изменчивости содержания озона и могут отличаться в связи с накладываемой на подобные оценки мелкомасштабной изменчивостью содержания озона.

Общим для 2015 и 2016 годов являлось формирование локальных максимумов, в основном в середине зимних месяцев, на высотах  $30\div 40$  км. При этом в январе каждого года формировались два последовательных максимума, а в феврале возникали основной максимум в середине месяца и несколько вторичных в течение всего месяца. Для межгодовых отличий можно отметить разное время формирования локальных максимумов, причём в январе 2015 года отмечалось несколько максимумов на разных высотах, а в январе 2016 года — два симметричных относительно середины месяца максимума на одинаковых высотах. В феврале 2015 года наблюдалось несколько максимумов содержания озона на высотах средней атмосферы, тогда как в 2016 году центральный максимум выглядел более сконцентрированным, чем остальные. Кроме того, в нижней стратосфере в 2016 году в середине первой декады и в конце третьей декады января отмечалось существенно более низкое содержание озона, чем в этот же период в 2015 году. Поскольку в 2016 году в эти периоды отмечалось и аномально низкое содержание озона в Арктике и на субарктических станциях [27], то можно предположить, что это уменьшение содержания озона в районе Нижнего Новгорода было связано с общими особенностями динамических условий, характерными для этой зимы.

Использование результатов численного моделирования совместно с результатами измерений позволяет идентифицировать причины возникновения локальных максимумов концентрации озона. С помощью модели была рассчитана фотохимическая продукция озона в районе Нижнего Новгорода. Каждый год наблюдалась тенденция его равномерного увеличения, связанная с увеличением периода освещённости. При этом локальных максимумов продукции озона не отмечается, из чего можно заключить, что наблюдаемые в зимние месяцы локальные максимумы содержания озона не связаны с кратковременным увеличением его производства. При этом максимум продукции озона отмечается на высотах  $40\div 50$  км, т. е. на 10 км выше максимума отношения смеси озона. Также был рассчитан коэффициент фотохимического разрушения озона. Как и для фотохимического производства, для фотохимического разрушения не наблюдается локальных максимумов, которыми можно было бы объяснить кратковременное уменьшение содержания озона, наблюдавшееся в течение обоих месяцев 2015 и 2016 годов. Таким образом, результаты моделирования показывают, что изменчивость фотохимических процессов не может объяснить формирование зимних локальных максимумов содержания озона в стратосфере над Нижним Новгородом.

Если не фотохимические процессы явились причиной наблюдавшихся максимумов содержания озона, последние могли сформироваться в результате динамических процессов переноса воздуха из районов, богатых или обеднённых озоном, а также в результате дивергенции и конвергенции потока воздуха. На рис. 3 представлена пространственно-временная эволюция температуры стратосферы над Нижним Новгородом, которая использовалась при численном моделировании изменчивости содержания озона. Температура атмосферы влияет на скорости химических реакций, однако, как показано выше, изменчивость фотохимических процессов не может объяснить формирование локальных максимумов содержания озона. Поэтому необходимо рассмотреть второй фактор влияния температуры — динамический. Локальные минимумы нагрева и температу-

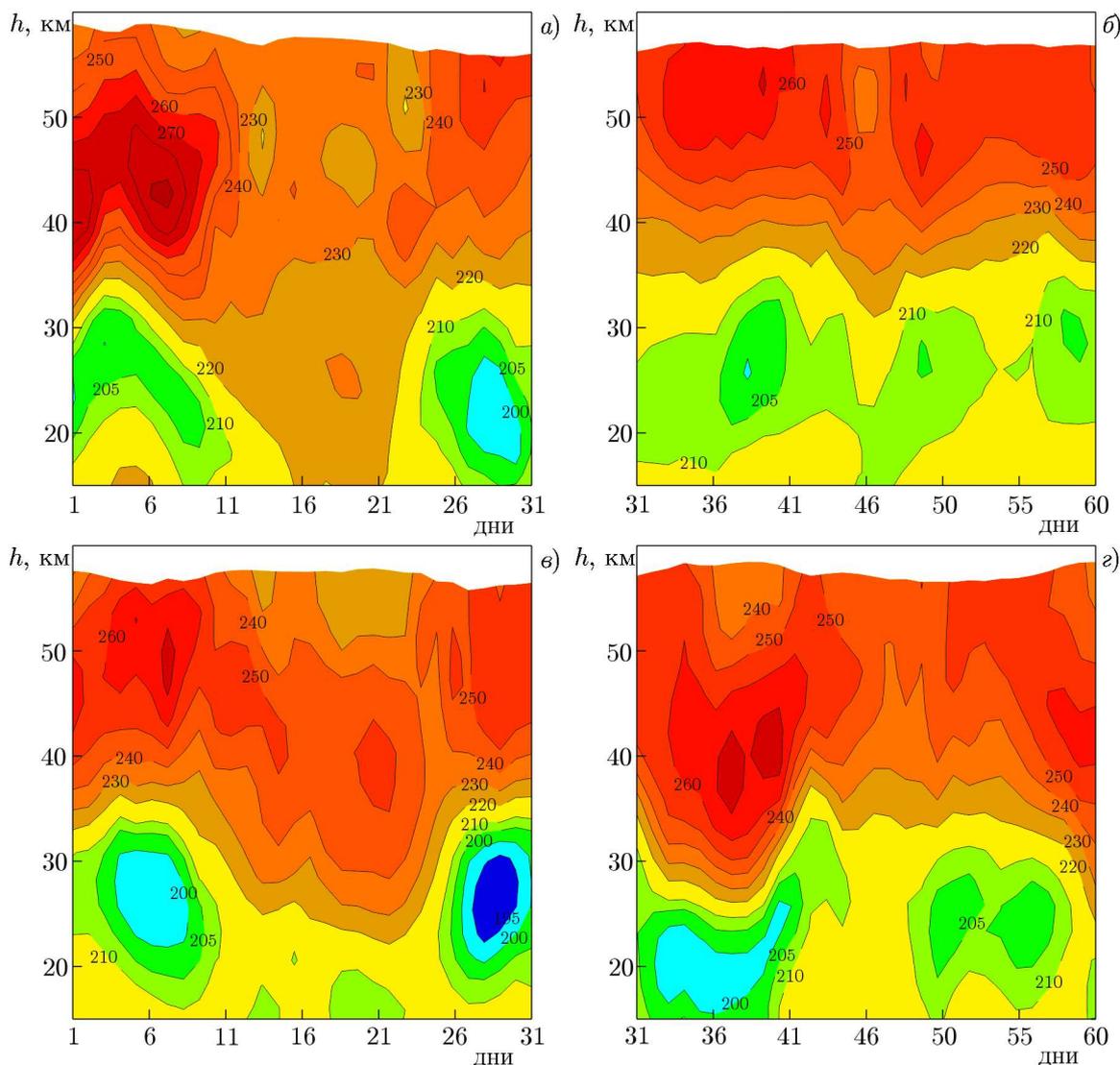


Рис. 3. Изменение температуры атмосферы  $T$ [K] по данным реанализа MERRA в январе (левый столбец) и феврале (правый столбец) 2015 (а, б) и 2016 года (в, з) годов

ры атмосферы могут приводить к возникновению потоков воздуха и переносу озона из областей с его пониженным содержанием, в результате чего могут сформироваться локальные минимумы содержания озона. Аналогично локальные максимумы содержания озона могут появляться в результате переноса воздуха из областей с его повышенным содержанием.

Отмечаемые локальные минимумы температуры в атмосфере над Нижним Новгородом в первых декадах января и февраля 2015 года существенно меньше по абсолютному значению, чем в третьей декаде января 2016 года. Это, с одной стороны, позволяет предположить, что при отмечаемых температурах ниже порога формирования полярных стратосферных облаков (около 195 K [28]) могут создаться локальные условия, способствующие разрушению озона по антарктическому образцу. Однако, с другой стороны, совпадение зон низких температур с зонами пониженного содержания озона в 2015 году позволяет предположить, что это может быть следствием влияния динамических условий как на дефицит массы, так и на дефицит тепла. Сравнение рассчитанных с помощью модели значений локальной продукции и разрушения озона в этот

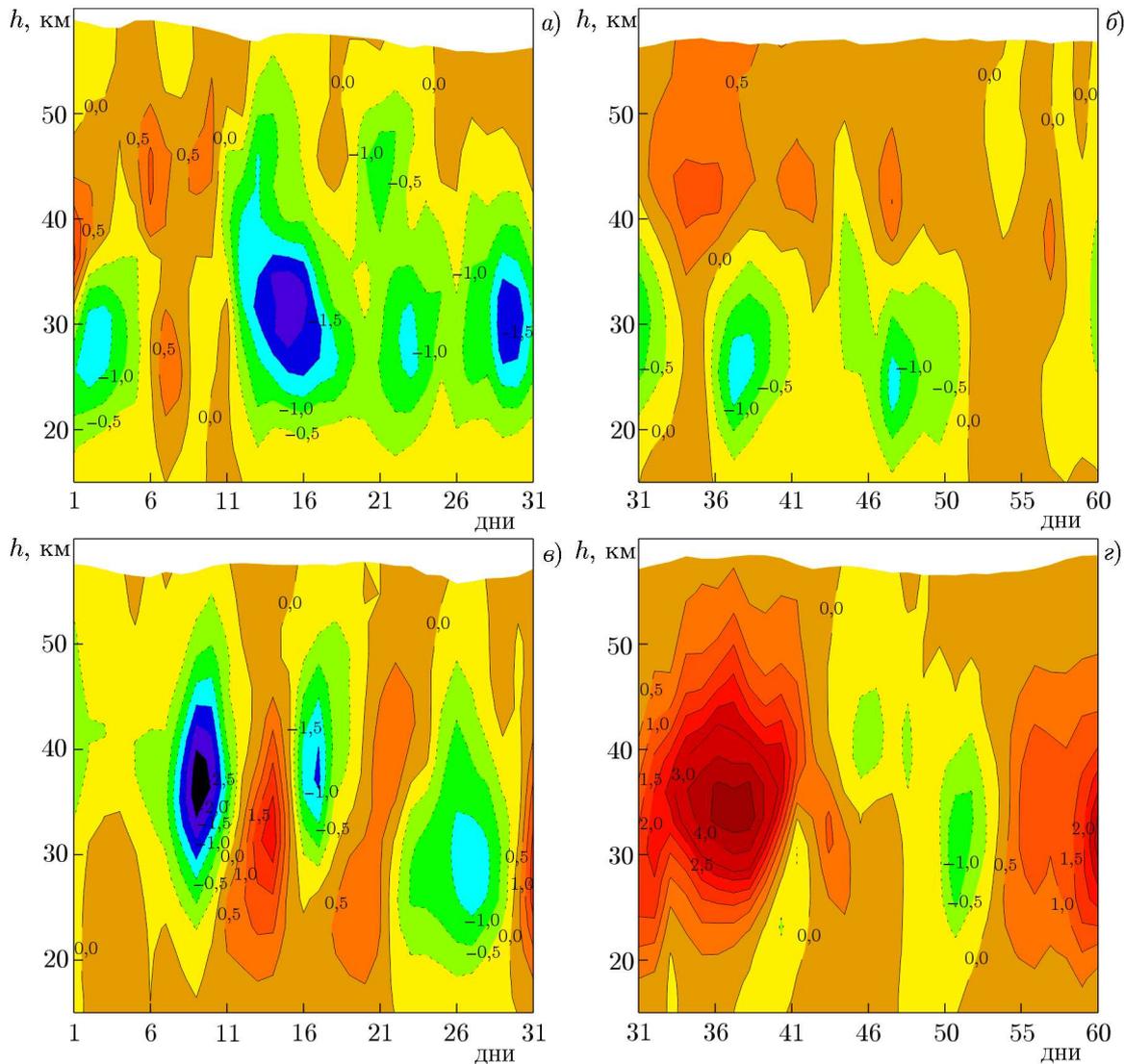


Рис. 4. Рассчитанное с помощью модели изменение меридионального потока озона  $F_m$  [ $10^{-4}$  см/с] в районе Нижнего Новгорода в январе (левый столбец) и феврале (правый столбец) 2015 (а, б) и 2016 (в, г) годов

период показывает, что принципиальных отличий между годами в этих характеристиках не обнаруживается. Это может служить признаком того, что первичными в причинах формирования пониженных значений содержания озона над Нижним Новгородом в нижней стратосфере скорее могут быть динамические процессы, одновременно влияющие и на понижение температуры, а не локальные фотохимические процессы, вызванные первичным понижением температуры.

На рис. 4 приведено изменение меридионального потока озона в стратосфере над Нижним Новгородом. Отрицательные значения потока соответствовали потоку с севера на юг, а положительные — потоку в обратном направлении. В январе 2015 года локальные максимумы содержания озона соответствуют северному направлению ветра, тогда как в 2016 году — потоку с юга на север. В феврале меридиональные потоки не совпадали с максимумами концентрации озона ни по высотным интервалам, ни по высотам. На рис. 5 приведён зональный поток озона, рассчитанный с помощью численного моделирования. Положительное направление соответствует переносу

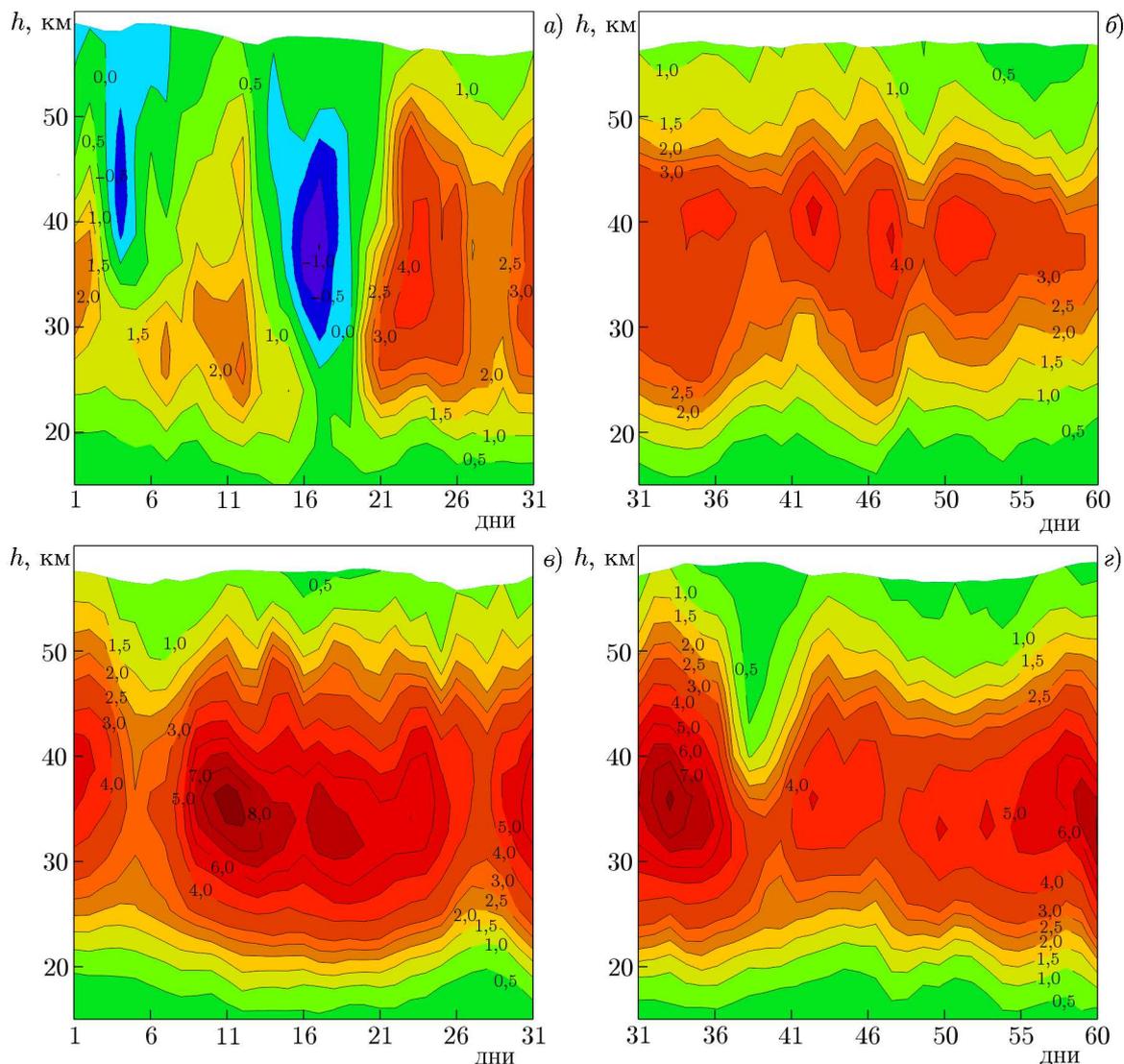


Рис. 5. Рассчитанное с помощью модели изменение зонального потока озона  $F_z$  [ $10^{-4}$  см/с] в районе Нижнего Новгорода в январе (левый столбец) и феврале (правый столбец) 2015 (а, б) и 2016 (в, з) годов

с запада на восток, отрицательное — с востока на запад. В течение исследуемых месяцев в основном преобладал западный перенос, только в январе 2015 года в середине месяца отмечалось обратное направление. При этом именно в январе 2015 года максимумы зонального потока не совпадали с максимумами содержания озона, а в остальные исследуемые месяцы западный перенос соответствовал максимумам содержания озона.

Помимо направления потока переноса воздуха большое значение для формирования максимумов содержания озона представляют процессы накопления массы озона за счёт локальных конвергентных потоков и уменьшения за счёт дивергентных. На рис. 6 приведена рассчитанная с помощью модели дивергенция меридионального потока озона. Следует отметить, что процессы накопления массы существенны в январе 2015 года, когда они приводили к образованию тонкой структуры максимумов содержания озона в середине месяца. Кроме того, дивергентные процессы были заметны в январе 2016 года и в феврале 2016 года, а в феврале 2015 года их роль была незначительна. Результаты расчётов на основе модели показывают, что зональные дивергентные

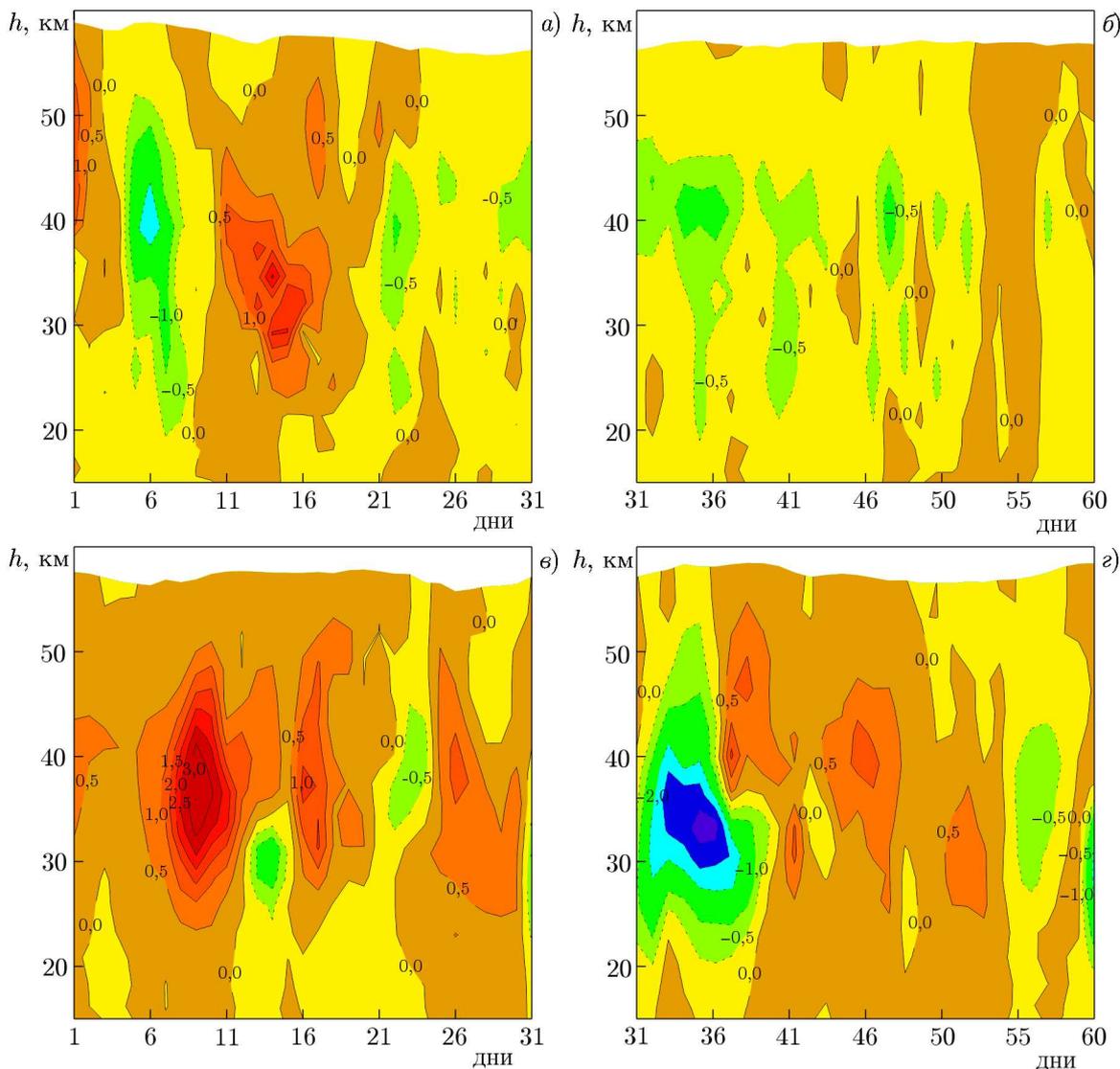


Рис. 6. Рассчитанное с помощью модели изменение дивергенции меридионального потока озона  $d_m$  [ $10^{-4} \text{ с}^{-1}$ ] в районе Нижнего Новгорода в январе (левый столбец) и феврале (правый столбец) 2015 (а, б) и 2016 (в, г) годов

потоки играют крайне малую роль в формировании локальных максимумов содержания озона над Нижним Новгородом.

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе проведено сравнение результатов наблюдений зимней изменчивости отношения смеси озона в атмосфере над Нижним Новгородом по результатам локальных наземных измерений с помощью спектрометрического комплекса, интерполяции спутниковых наблюдений (прибор SBUV), данных реанализа MERRA и численного моделирования с использованием модели состава нижней и средней атмосферы, в которой динамические параметры задавались из данных реанализа MERRA, а содержание озона рассчитывалось с учётом влияния фотохимических и динамических процессов. Сравнение показало, что все типы данных дают сходную

картину изменчивости содержания озона в течение зимних месяцев 2015 и 2016 годов, основными чертами которой является наличие стабильного высотного максимума отношения смеси озона в средней стратосфере, на который накладываются кратковременные периоды увеличения его содержания. При этом результаты измерений с использованием спектрометрического комплекса в целом хорошо соответствуют другим типам данных, а некоторые количественные различия, характерные и для других типов данных, скорее всего, обусловлены локальной изменчивостью содержания озона, т. к. только данные спектрометрического комплекса являются точечными, а остальные характеризуют площадную изменчивость.

Использование численного моделирования позволило оценить влияние фотохимических и динамических факторов на наблюдаемую изменчивость содержания озона в зимние месяцы в атмосфере над Нижним Новгородом. Проведённый анализ показал, что фотохимические процессы локального образования и разрушения озона не являются источником наблюдаемых кратковременных максимумов содержания озона. Среди динамических процессов важную роль играют меридиональный перенос озона из насыщенных и обеднённых озоном областей, а также локальные эффекты дивергенции и конвергенции зонального и меридионального потоков. При этом в разные годы направление меридионального потока воздуха, соответствующее кратковременным периодам увеличения и уменьшения содержания озона на высотах его максимума, может быть как северным, так и южным. Определённым индикатором формирования кратковременных максимумов содержания озона может служить температура атмосферы, отклонение которой от средних климатических значений характеризует изменчивость динамических процессов, определяющих вариации отношения смеси озона на высотах стратосферы.

Работа выполнена в ИПФ РАН при поддержке Российского научного фонда (проект 15-17-10024). Разработка модели состава нижней и средней атмосферы с использованием данных реанализа осуществлена в РГГМУ в рамках государственного задания Министерства образования и науки РФ (проект 5.6493.2017/БЧ). Учёт изменчивости потоков солнечной радиации, соответствующей солнечной активности, в модели состава атмосферы проводился с использованием результатов, полученных при выполнении проекта РФФИ (17-05-01277-а).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2010. World Meteorological Organization. Global Ozone Research and Monitoring Project. Report No. 52. Geneva, 2011. 516 p.
2. Bhartia P. K., McPeters R. D., Flynn L. E., et al. // Atmos. Meas. Tech. 2013. No. 6. P. 2533.
3. Thompson A. M., Witte J. C., McPeters R. D., et al. // J. Geophys. Res. 2003. V. 108, No. D2. P. 8238.
4. Thompson A. M., Stone J. B., Witte J. C., et al. // J. Geophys. Res. 2007. V. 112, No. D12. Art. no. D12S13.
5. Smit H. G. J., Straeter W., Johnson B., et al. // J. Geophys. Res. 2007. V. 112. Art. no. D19306.
6. Thompson A. M., Witte J. C., Oltmans S. J., et al. // J. Geophys. Res. 2003. V. 108, No. D2. P. 8241.
7. Thompson A. M., Witte J. C., Oltmans S. J., Schmidlin F. J. // B. Am. Meteorol. Soc. 2004. V. 85, No. 10. P. 1549.
8. Красильников А. А., Куликов М. Ю., Кукин Л. М. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2013. Т. 56, № 8–9. С. 699.
9. Куликов М. Ю., Красильников А. А., Швецов А. А. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2015. Т. 58, № 6. С. 454.

10. Mukhin D. N., Feigin A. M., Molkov Ya. I., Suvorov E. V. // *Adv. Space Res.* 2006. V. 37, No. 12. P. 2292.
11. Rodgers C. D. *Inverse Methods for Atmospheric Sounding: Theory and Practice.* Singapore: World Scientific, 2000. 238 p.
12. <http://ras.ru/scientificactivity/scienceresults/annualreport.aspx>.
13. Frederick J. E., Cebula R. P., Heath D. F. // *J. Atmos. Ocean. Tech.* 1986. V. 3. P. 472.
14. Heath D. F., Krueger A. J., Roeder H. A., Henderson B. D. // *Opt. Eng.* 1975. V. 14. P. 323.
15. Mateer C. L., Heath D. F., Krueger A. J. // *J. Atmos. Sci.* 1971. V. 28. P. 1307.
16. Тимофеев Ю. М. Глобальная система мониторинга параметров атмосферы и поверхности. СПб: Изд-во Санкт-Петербург. ун-та, 2009. 129 с.
17. Поляков А. В. Определение газового состава атмосферы и характеристик аэрозоля: Дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Санкт-Петербург, 2006. 373 с.
18. Rienecker M. M., Suarez M. J., Gelaro R., et al. // *J. Climate.* 2011. V. 24. P. 3624.
19. Смышляев С. П., Виролайнен Я. А., Моцаков М. А. и др. // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 2017. Т. 53, № 3. С. 343.
20. Галин В. Я., Смышляев С. П., Володин Е. М. // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 2007. Т. 43, № 4. С. 437.
21. Смышляев С. П., Галин В. Я., Атласкин Е. М., Блакитная П. А. // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 2010. Т. 46, № 5. С. 672.
22. Смышляев С. П., Мареев Е. А., Галин В. Я. // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 2010. Т. 46, № 4. С. 487.
23. Смышляев С. П., Галин В. Я., Блакитная П. А., Лемищенко А. К. // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 2016. Т. 52, № 1. С. 19.
24. Sander S. P., Abbatt J., Barker J. R., et al. *Chemical kinetics and photochemical data for use in atmospheric studies. Evaluation 17.* JPL Publication 10-6, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, 2011. 684 p.
25. Dvortsov V. L., Zvenigorodsky S. G., Smyshlyaev S. P. // *J. Geophys. Res.* 1992. V. 104, No. D21. P. 26401.
26. DeWolfe A. W., Wilson A., Lindholm D. M., et al. // *Abstracts of the Amer. Geophys. Union Fall Meeting 13–17 December 2010, San Francisco.* No. GC21B-0881.
27. Смышляев С. П., Тимофеев Ю. М., Кирнер О. и др. // Тез. XIV Всеросс. конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 14–18 ноября 2016 года, Москва. С. 196.
28. Смышляев С. П., Галин В. Я., Шаарийбуу Г., Моцаков М. А. // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 2010. Т. 46, № 3. С. 291.

Поступила в редакцию 23 сентября 2016 г.; принята в печать 17 марта 2017 г.

**OZONE CONTENT VARIABILITY IN ATMOSPHERE ABOVE NIZHNY  
NOVGOROD: COMPARISON OF THE RESULTS OF THE RADIOMETRIC  
AND SATELLITE MEASUREMENTS, REANALYSIS, AND NUMERICAL  
SIMULATION**

*T. S. Ermakova, S. P. Smyslyaev, M. Yu. Kulikov, M. V. Belikovich, A. A. Krasil'nikov, V. G. Ryskin,  
A. A. Nechaev, and A. M. Feigin*

We compare the results of observations and numerical simulation of the ozone-content variability in the atmosphere above Nizhny Novgorod for the winters of 2015 and 2016. The data of the local ground-based measurements and the MERRA reanalysis, the satellite data (SBUV device), and the numerical-simulation results are used. The analysis of the results demonstrates similar patterns of the ozone-content variability for all data sources. The stable altitude maximum in the middle stratosphere with the short-term periods of the ozone-density increase is observed. Using the numerical-analysis data allows one to estimate the influence of the photochemical and dynamic factors on the observed ozone-content variability in the winter months in the atmosphere above Nizhny Novgorod.