

РАДИАЦИЯ И БИОСФЕРА

УДК 551.521.17, 551.510.4, 551.515.7

Влияние озоновых мини-дыр в мае 2021 г. и марте 2022 г. на отдельных территориях России на приземную УФ-радиацию по данным спутниковых наблюдений и моделирования

П.Н. Варгин^{✉1,2}, Б.А. Фомин¹, В.А. Семенов^{2*}

¹Центральная аэрологическая обсерватория
141700, г. Долгопрудный, Московская обл., ул. Первомайская, 3
²Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН
119017, г. Москва, Пыжевский пер., 3

Поступила в редакцию 7.12.2022 г.;
после доработки 13.02.2023 г.;
принята к печати 21.02.2023 г.

С использованием данных спутникового инфракрасного спектрометра AIRS и реанализа NCEP исследуются механизмы формирования озоновых мини-дыр (ОМД) и их влияние на уровни УФ-радиации (УФР) с 22 по 24 мая 2021 г. в средней и южной частях Поволжья, юге Урала и Западной Сибири и с 16 по 18 марта 2022 г. на северо-западе европейской территории России. Формирование этих ОМД обусловлено связанным с антициклоном повышением тропопаузы и переносом обедненных озоном воздушных масс из субтропиков. В первый период в области ОМД с отрицательными аномалиями общего содержания озона (ОСО) до ~20% от средних значений с 2003 по 2021 г. положительные аномалии УФР достигали 40–60%, а УФ-индекс увеличился от ~6 до ~8. Во второй период в области ОМД с отрицательными аномалиями ОСО до ~–40% положительные аномалии УФР достигли 40–60%, а УФ-индекс увеличился от ~1 до ~2. Расчеты потоков УФР с помощью оригинальной радиационной модели подтвердили рост УФР в области ОМД, выявленный по спутниковым наблюдениям.

Ключевые слова: озоновые мини-дыры, УФ-радиация, антициклоны, тропосфера; ozone mini-hole, UV radiation, anticyclone, troposphere.

Введение

Озоновый слой, защищающий биосферу от опасных уровней УФ-радиации (УФР), обладает неравномерным распределением: по широте — значительно большее общее содержание озона (ОСО) наблюдается в высоких широтах по сравнению со средними и низкими; по долготе — вследствие горизонтальной адвекции (переноса), связанной с квазистационарными планетарными волнами, а также по высоте — большая часть озонового слоя (до 70% ОСО) расположена в нижней стратосфере [1]. В средних и высоких широтах (за исключением области стратосферного полярного вихря) из-за сезонной изменчивости большее ОСО наблюдается в зимне-весенний, а не в летне-осенний период.

Пристальное внимание ученых и общественности к изменениям озонового слоя в конце 1980-х —

начале 1990-х гг. было обусловлено обнаружением значительных весенних аномалий (озоновых дыр) в Антарктике, которые, как было установлено, связаны с антропогенными выбросами озоноразрушающих соединений (ОРС) и могут приводить к увеличению приземной УФР [2] с многочисленными негативными эффектами для окружающей среды и здоровья человека [3].

Принятие международным сообществом в 1987 г. Монреальского протокола привело к ограничению и последующему запрещению использования ОРС. Однако, несмотря на выявленное в последние годы сокращение ОРС в атмосфере, значительное разрушение озонового слоя в отдельные годы наблюдается не только в Антарктике, но и в Арктике, как, например, в марте 2011 [4] и 2020 гг. [5, 6]. В некоторые дни разрушение озонового слоя в нижней стратосфере составляло до 80% [7].

Сильное разрушение озонового слоя в Арктике весной 2020 г. привело к увеличению УФ-индекса: максимальный рост (~140%) зафиксирован 6.04.2020 г. по данным наземных наблюдений на ст. Соданкюла (67,37° с.ш., 26,63° в.д.) на севере

* Павел Николаевич Варгин (p_vargin@mail.ru); Борис Алексеевич Фомин (b.fomin@mail.ru); Владимир Анатольевич Семенов (vasemenov@mail.ru).

Финляндии [8]. Среднемесячные значения УФ-индекса повысились над севером Канады на 75% в марте и на 25% в апреле 2020 г. [8]. Однако рост УФР произошел при низком солнце, из-за чего УФ-индекс не превышал характерных летних значений в условиях чистого неба. Модельные оценки показали, что сильное разрушение озона, как весной 2011 г., может привести к сохранению обедненных озоном воздушных масс и, как следствие, к повышенной УФР в средних и высоких широтах до летних месяцев включительно [9].

Сокращение озонового слоя и увеличение приземной УФР повышают риск онкологических заболеваний кожи, в том числе одной из самых опасных разновидностей — меланомы. Связь сокращения озонового слоя, увеличения приземной УФР и риска заболеваемости меланомой была выявлена для периода 1980–1990-х гг. на основе данных диагностики более чем 2,4 млн жителей Канады [10]. Рост онкологических заболеваний кожи наблюдается во многих странах, например в США рост заболеваний меланомой с 1975 по 2010 г. составлял до ~3% ежегодно [11]; в России с 2010 по 2020 г. среднегодовой прирост также составил ~3% [12].

На основе анализа наземных наблюдений выявлен положительный тренд приземной УФР с 2005 по 2018 г. вблизи Варшавы [13]. Весной, в частности в апреле, отрицательные аномалии озона наблюдаются при положительных аномалиях температуры, когда люди находятся на открытом солнце более продолжительное время с большей поверхностью открытого тела, что при повышенных уровнях УФР может быть опасным для здоровья. Кроме того, в начале весны кожа человека еще не адаптирована к повышенной УФР и поэтому более чувствительна к ее изменениям.

Результаты модельных расчетов показывают, что 30-летний период действия Монреальского протокола позволил избежать значительного роста опасных уровней УФР во многих регионах, в том числе в средних широтах Северного полушария [14]. Однако, несмотря на выявленные с начала 2000-х гг. первые признаки восстановления озонового слоя, в средних широтах сохраняется отрицательный тренд [15].

На восстановление озонового слоя, ожидающееся во второй половине текущего столетия, влияет изменение климата, связанное с увеличением концентраций парниковых газов [2, 16, 19]. В частности, усиление меридиональной циркуляции может привести к уменьшению содержания озона в нижней стратосфере низких широт (где его и так меньше, чем в высоких) и к увеличению его содержания в высоких широтах [2, 17]. В этой связи продолжение исследований и развитие мониторинга озонового слоя и УФР сохраняют свою актуальность [2, 18].

Расчеты будущего климата показывают, что, несмотря на сокращение содержания ОРС, во второй половине XXI в. при жестком сценарии роста парниковых газов возможно усиление стратосферного полярного вихря в Арктике, способное при-

вести к значительному разрушению озонового слоя в отдельные зимы [19, 20].

Кроме существенного разрушения озонового слоя в отдельные годы весной в стратосфере Антарктики и Арктики в средних — высоких широтах наблюдаются озоновые мини-дыры (ОМД) — достаточно глубокие нестационарные аномалии ОСО синоптического масштаба с продолжительностью в несколько дней. ОМД формируются чаще зимой, чем летом, и чаще в Северном полушарии, чем в Южном [21].

Возникновение ОМД главным образом обусловлено динамическими механизмами и связано с изменением высоты тропопаузы при прохождении циклонов и антициклонов [21, 22]. Однако в некоторых случаях ОМД в зимне-весенний период формируется в том числе из-за разрушения озона в нижней стратосфере в результате гетерогенных реакций как, например, на севере Сибири в январе — марте 2016 г. [23, 24]. Для этой ОМД расчеты показали, что понижение ОСО не оказывает существенного влияния на уровень приземной УФР [25]. Однако в начале весны меньшее сокращение ОСО, по сравнению с январем-февралем, может привести к повышению уровня эритемной УФР до значений, представляющих опасность для здоровья человека.

Формирование ОМД летом 2010 г. над европейской территорией России (аномалии ОСО площадью более 11 млн км² и дефицит ОСО до 37 единиц Добсона (е.Д.), или ~11%) было связано с блокирующим антициклоном, приведшим к рекордной жаре и сильным лесным пожарам в июле и первой половине августа [26].

Из-за продолжающегося глобального потепления увеличивается вероятность более длительных атмосферных блокировок [27]. Это может привести в евро-атлантическом секторе к учащению формирования зимних ОМД [28]. В этой связи исследование влияния ОМД на уровни приземной биологически активной УФР на территории России представляет не только научный, но и практический интерес.

В настоящей работе исследуются ОМД с 22 по 24 мая 2021 г. в средней и южной частях Поволжья, юге Урала и Западной Сибири и с 16 по 18 марта 2022 г. на севере европейской территории России и их влияние на приземную УФР. Эти ОМД были выявлены по результатам анализа наземных наблюдений ОСО на станциях озонового мониторинга Росгидромета [29, 30].

1. Данные и методы исследований

В настоящей работе анализировались данные измерений общего содержания озона спутниковым инфракрасным (ИК) спектрометром высокого разрешения AIRS (Atmospheric InfraRed Sounder), регистрирующим видимую и ИК-радиацию в 2382 каналах диапазона длин волн 0,4–15,4 мкм. Спектрометр AIRS размещен на спутнике Aqua (США), запущенном в мае 2002 г. на околополярную солнечно-синхронную орбиту высотой 705 км; период

обращения спутника 98,8 мин. Сканирующая система прибора обеспечивает ежедневное покрытие данными 95% земной поверхности. В алгоритме восстановления озона используются измерения ИК-радиации в области длин волн 9,3–10,1 мкм и сопутствующие измерения микроволнового радиометра AMSU (Advanced Microwave Sounding Unit), размещенного на том же спутнике, позволяющие восстанавливать параметры атмосферы при облачном покрытии до 80% [31]. Пространственное разрешение данных AIRS/AMSU по измерениям в надир составляет ~45 км. Расчетная точность определения ОСО 20%. Привлекались также измерения температуры спектрометром AIRS, расчетная точность которой ~1 К в слое 1 км.

Ежедневные данные ОСО, высоты тропопаузы, температуры на 24 уровнях от поверхности до верхней стратосферы (до уровня давления 1 гПа, ~48 км) и с разрешением по долготе и широте $1^\circ \times 1^\circ$ (версия данных AIRXSTD 006) были получены с помощью системы сбора, анализа и визуализации спутниковых данных «Giovanni» (<https://disc.sci.gsfc.nasa.gov/giovanni>), разработанной Космическим агентством США [32]. Аналогичным образом были получены значения эритемной дозы УФР и УФ-индекса с таким же разрешением (версия данных OMUVBd) на основе наблюдений прибора OMI со спутника Aura (США).

Для анализа динамических процессов в тропосфере и нижней стратосфере использовались ежедневные данные реанализа NCEP [33]. Аномалии рассчитывались относительно климатических значений с 1981 по 2010 г. Аномалии высоты тропопаузы, ОСО, УФР, УФ-индекс оценивались относительно средних многолетних ежедневных значений, рассчитанных с начала наблюдений спутникового прибора AIRS (2003–2021 гг.).

Доза эритемной УФР, являющейся мерой потенциально опасной УФР, достигающей поверхности, рассчитывается как интеграл произведения спектральной плотности энергетической освещенности (Q) на спектр биологического эритемного действия (E) в диапазоне длин волн от 280 до 400 нм [34]. По последним оценкам ошибки спутниковых наблюдений доз эритемной УФР по сравнению с наземными наблюдениями могут составлять до 20%. Эти ошибки обусловлены рядом факторов, затрудняющих спутниковые наблюдения: особенности облачности, распределение аэрозоля и альbedo поверхности, а так же предположением о постоянстве атмосферных условий между местным полднем и временем прохождения спутника [35].

Для удобства и с целью широкого оповещения населения об уровне УФР, опасном с точки зрения образования эритемы, используется УФ-индекс (УФИ) [36]. Он определяется как $UVI = Q_{ery}/0,025$, где Q_{ery} – плотность потока эритемной УФР. УФИ варьируется от 0 ночью до 10 в ясный летний день на уровне моря в средних широтах Северного полушария, достигает 15–16, например, в Австралии и возрастает до 20–25 в высокогорных районах Анд в Перу, Боливии и Аргентины.

Чем больше УФИ, тем выше потенциальная опасность для кожи и глаз человека и тем меньше время, за которое может быть причинен вред здоровью. При УФИ = 1–2 защита от УФР не требуется; от 3 до 7 – необходима защита от солнца в полуденные часы (использование солнечно-защитных средств); от 8 до 10 – требуется усиленная защита, включая обязательное прикрытие одеждой головы, плеч, рук и солнечно-защитные средства с более высоким фактором защиты.

Опасные пороговые значения УФИ зависят от типа кожи. Для населения России характерны типы от 1 до 3-го; для них пороговые значения УФИ составляют 2,2; 2,8 и 3,3 соответственно [37]. Для людей с более темной кожей (4–6-й типы) – жителей субтропиков и тропиков пороговые значения – 5; 6,7 и 11 соответственно.

Заметный рост заболеваемости раком кожи (и его наиболее опасным типом – меланомой) людей со светлой кожей в значительной степени связывают с чрезмерным воздействием солнечного УФ-излучения и, вполне вероятно, от искусственных источников, которые используются, например, для загара. По мнению Всемирной организации здравоохранения, нынешний уровень заболеваемости указывает на то, что индивидуальные привычки людей, связанные с пребыванием на солнце, являются серьезным фактором риска [38].

Для проверки оценок увеличения приземной УФР по спутниковым наблюдениям были проведены расчеты с помощью оригинальной «быстрой» радиационной модели [39]. Быстрота обеспечивается тем, что в модели спектры поглощения радиации озоном параметризуются методом k -распределений. Это позволяет вычислять интегральные потоки эритемной УФР в диапазоне 280–400 нм однократным решением уравнений переноса радиации в вертикально неоднородной атмосфере (методом Монте-Карло). При этом учитываются спектральные факторы, характеризующие биологические эффекты: выработка витамина D, риск возникновения онкологии кожи (включая меланому) и катаракты.

2. Результаты и обсуждение

2.1. Озоновые мини-дыры 22–24 мая 2021 г.

Распределение ОСО в северо-западной Европе с 22 по 24 мая 2021 г. представлено на рис. 1, а. Область пониженных значений ОСО до 270 е.Д. наблюдается северо-восточнее Каспийского моря, на юге Урала и юге Западной Сибири. Климатические значения ОСО с 2003 по 2021 г. для этого региона составляют ~360–380 е.Д. Аномалии ОСО в период ОМД достигали более 20% (рис. 1, б).

В области ОМД высота тропопаузы повышена на 1–1,5 км по сравнению с климатическими значениями (рис. 2, а, б). Для региона северо-восточнее Каспийского моря, где наблюдалась ОМД (50–60° с.ш., 70–90° в.д.), выявлена отрицательная корреляция ОСО и высоты тропопаузы в мае – июне 2021 г. с коэффициентом –0,82 (рис. 2, в).

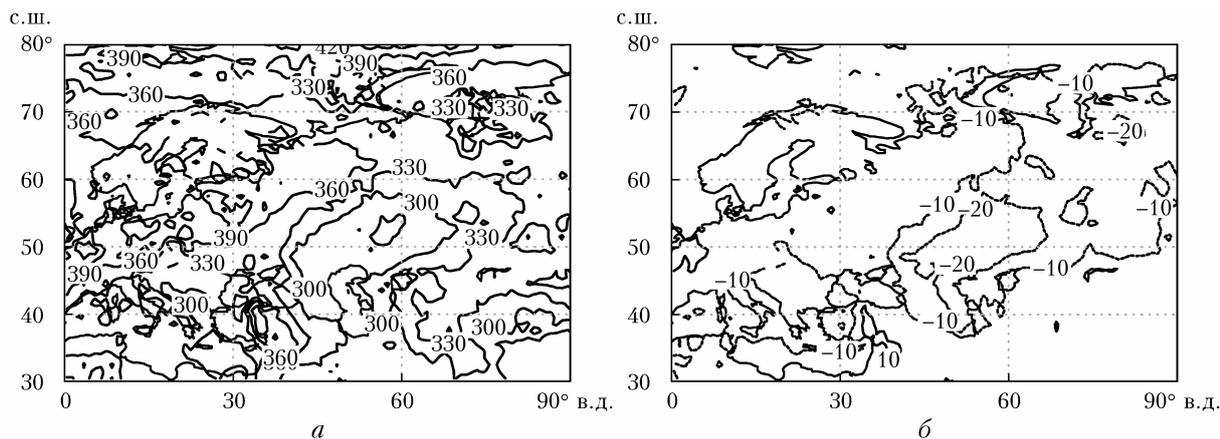


Рис. 1. Общее содержание озона с 22 по 24 мая 2021 г., е.Д. (а); его аномалии относительно многолетних средних значений с 2003 по 2021 г., % (б)

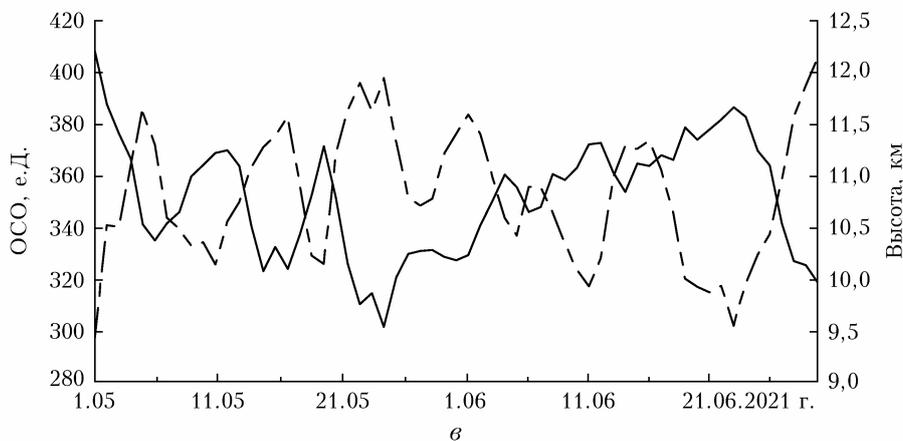
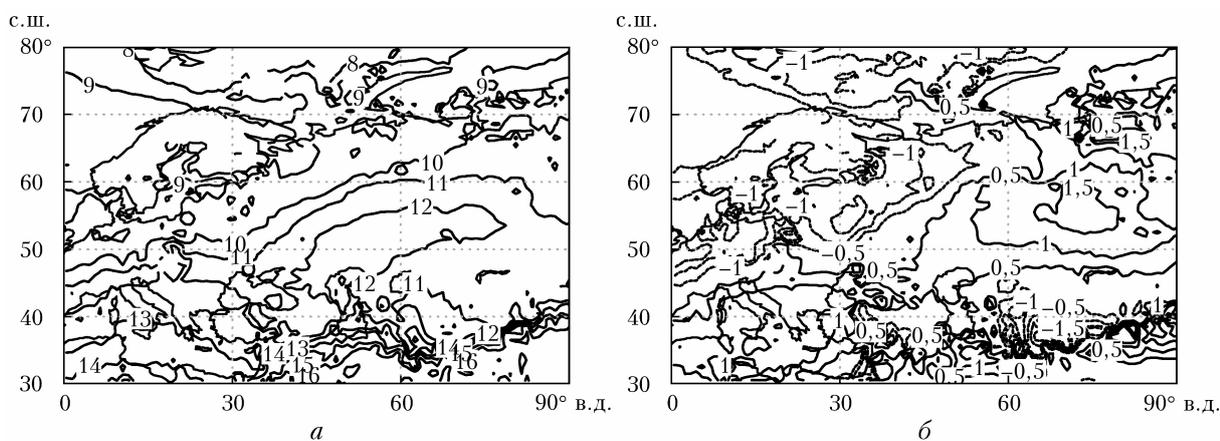


Рис. 2. Высота тропопазы с 22 по 24 мая 2021 г., км (а); ее аномалии относительно средних многолетних значений с 2003 по 2021 г., км (б); изменение ОСО (сплошная линия) и высоты тропопазы (пунктирная кривая) в области 50–60° с.ш., 70–90° в.д. с 1 мая по 30 июня 2021 г. (в)

Повышенная высота тропопазы свидетельствует об антициклоне в области формирования ОМД. Это подтверждает распределение геопотенциальной высоты в тропосфере на уровне давления 500 гПа (рис. 3, а, цв. вкладка). Ее отклонения от среднезональных значений в области антициклона и ОМД составляют более 200 гпм (рис. 3, б).

Анализ атмосферной циркуляции в тропосфере на уровне давления 500 гПа свидетельствует, что

воздушный поток при приближении к области блокирующего антициклона огибал ее с севера и далее отклонялся к югу (рис. 4). Аналогичная картина наблюдалась и в нижней стратосфере на уровне 200 гПа.

По многолетним данным максимум ОСО в зимне-весенний сезон наблюдается над Восточной Сибирью и севером Канады [1]. Перенос воздуха с юга на север вдоль западной периферии антициклона приводит к замещению воздушных масс вблизи

максимума ОСО воздушными массами с пониженным содержанием озона из субтропиков. При этом замещение арктического воздуха субтропическим связано с подъемом высоты тропопаузы (см. рис. 2), что также способствует уменьшению ОСО.

Проанализируем особенности распределения эритемной УФР и УФИ в период ОМД (рис. 5). Наибольшие положительные аномалии эритемной УФР, до 40–60%, выявлены к северо-востоку от Каспий-

ского моря в регионе Уральских гор (рис. 5, б). УФИ достигал 6–8, что является опасным уровнем для людей с 1–3-м типами кожи (рис. 5, в), при котором необходимо использовать солнечно-защитные средства и ограничивать время пребывания на открытом солнце. Максимальное увеличение УФИ, до двух единиц относительно средних многолетних значений, наблюдалось над югом Поволжья и югом Западной Сибири (рис. 5, з).

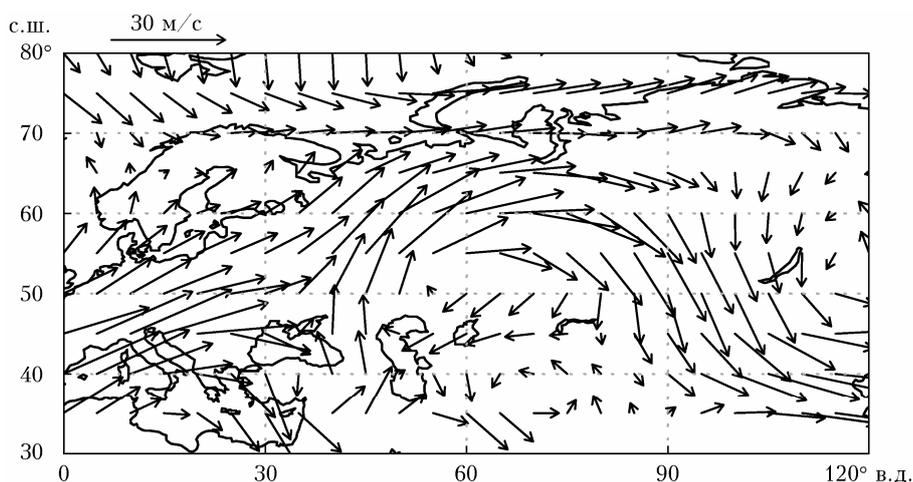


Рис. 4. Векторы ветра на уровне давления 500 гПа с 22 по 24 мая 2021 г.

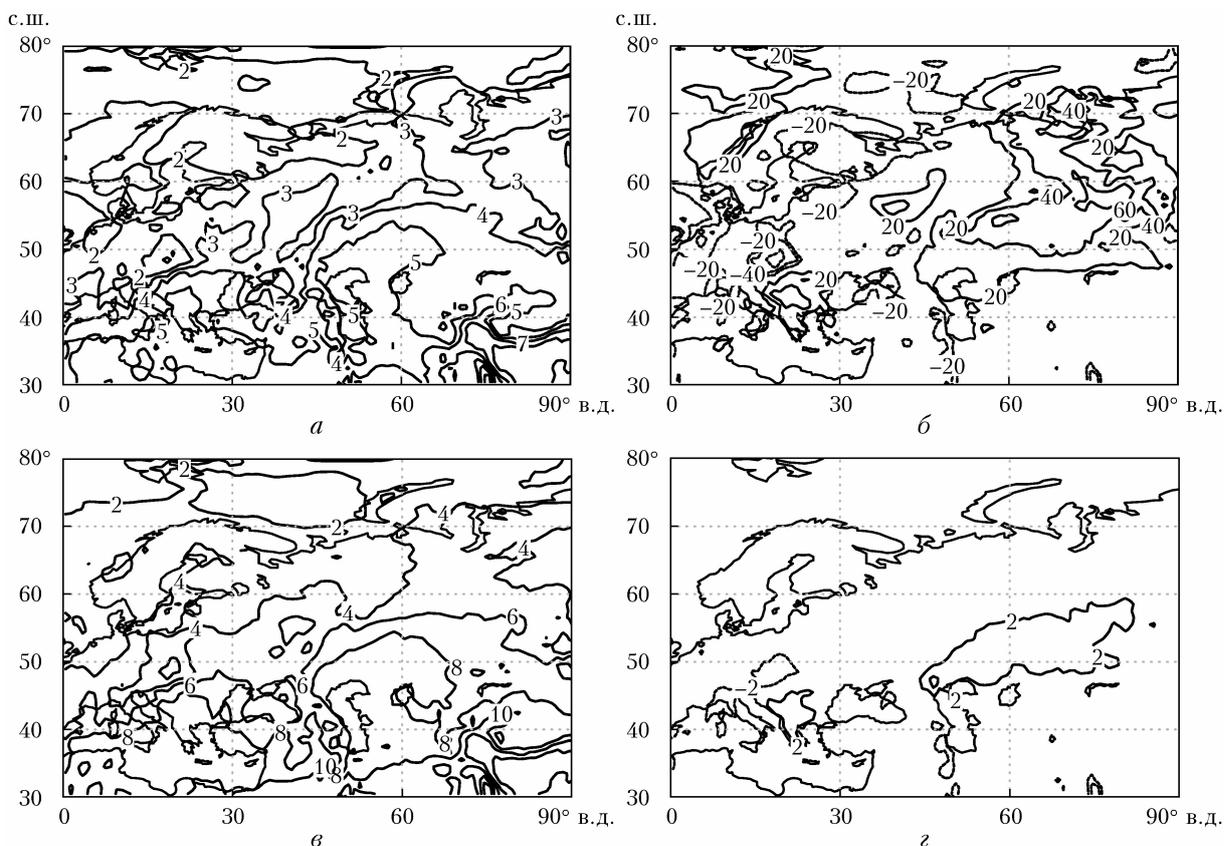


Рис. 5. Эритемная УФР, Дж/м² (а) и ее аномалии, % (б), УФИ (в) и его аномалии (з) относительно многолетних средних значений за 2003–2021 гг. с 22 по 24 мая 2021 г.

2.2. Озоновые мини-дыры с 16 по 18 марта 2022 г.

Второй эпизод ОМД характеризовался пониженным ОСО с 16 по 18 марта 2022 г. над северо-востоком европейской территории России и севером Урала. Спутниковые данные AIRS показывают, что значения ОСО от ~200 до ~250 е.Д. были на 30–40% меньше, чем характерные для данного периода и региона климатические значения (~400 е.Д.) (рис. 6).

В период ОМД высота тропопаузы увеличилась от ~1 до ~3 км (рис. 7, а, б). Понижение ОСО 16–18 марта 2022 г. сопровождалось повышением высоты тропопаузы в области ОМД (рис. 7, в). Меньший коэффициент корреляции (–0,52) в феврале – марте 2022 г. по сравнению с маем – июнем 2021 г. (см. рис. 2, в) предположительно обусловлен тем, что на ОСО в высоких широтах (55°–65° с.ш.) повлиял перенос озона из-за минорного внезапного стратосферного потепления (ВСП) в начале марта и главного ВСП 20 марта 2022 г.

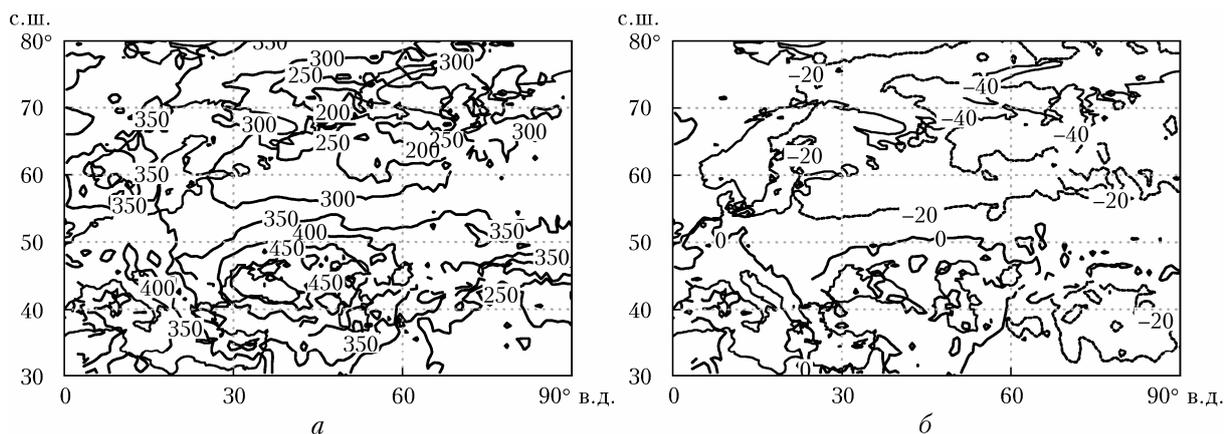


Рис. 6. ОСО на севере Евразии с 16 по 18 марта 2022 г., е.Д. (а); его аномалии относительно многолетних средних значений, % (б)

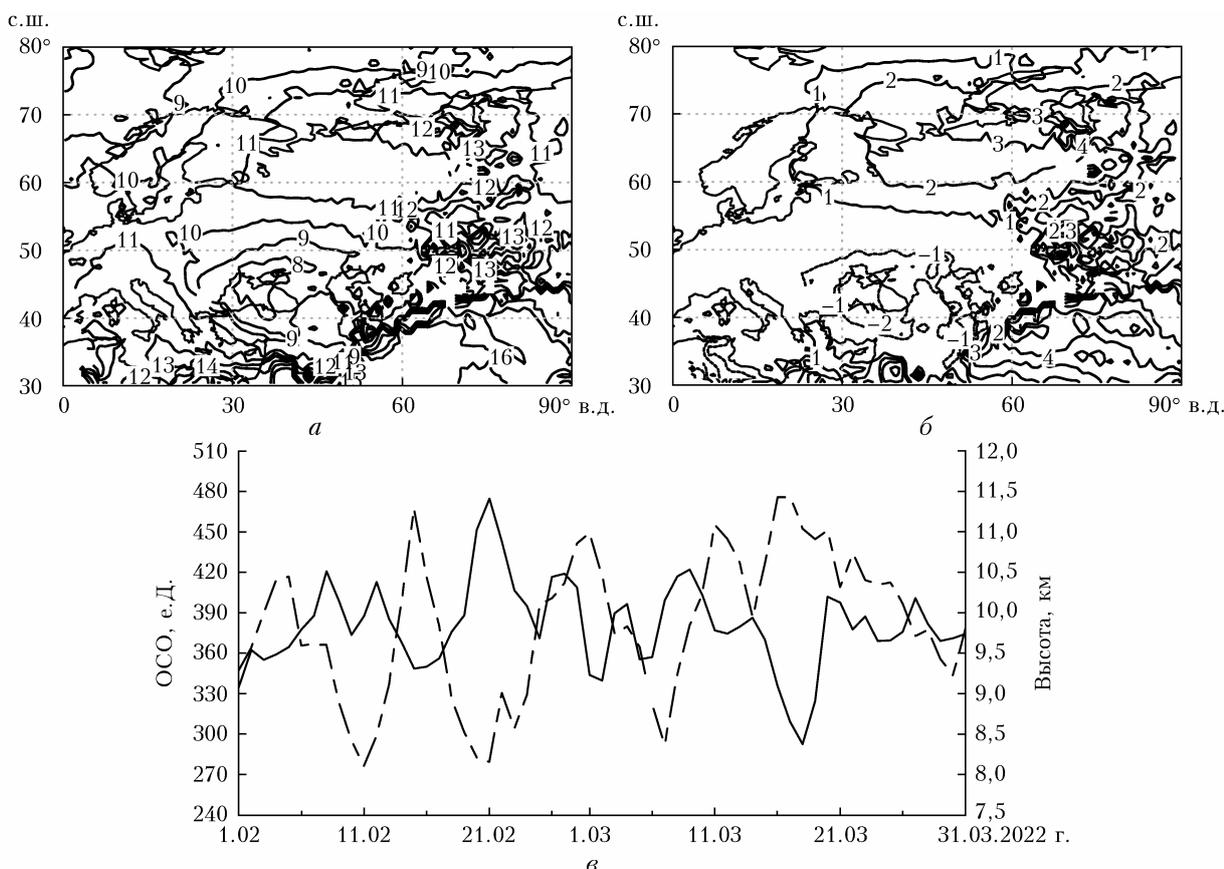


Рис. 7. Высота тропопаузы с 16 по 18 марта 2022 г., км (а); ее аномалии относительно многолетних средних значений, км (б); ОСО (сплошная кривая) и высота тропопаузы (пунктирная кривая) в области 55°–65° с.ш., 30°–60° в.д. с 1 февраля по 31 марта 2022 г. (в)

Повышенная высота тропопаузы свидетельствует об антициклоне в области ОМД. Анализ распределения геопотенциальной высоты на уровне давления 500 гПа подтверждает это предположение (рис. 8, *а*, цв. вкладка). Ее отклонения от среднезональных значений в области антициклона и ОМД составляют более 300 гм (рис. 8, *б*).

По многолетним данным максимум ОСО над севером Сибири в зимне-весенний период отмечается вблизи $\sim 60^\circ$ с.ш. Перенос воздуха с юга на север вдоль западной периферии блокирующего антициклона над Скандинавией и западной Атлантикой приводит

к замещению обогащенного озоном воздуха вблизи максимума ОСО обедненным озоном воздушными массами из субтропиков (рис. 9). Таким образом, подъем тропопаузы и замещение арктического воздуха субтропическим способствовали уменьшению ОСО.

Анализ распределения эритемной УФР с 16 по 18 марта 2022 г. показал ее увеличение на 40–60% на севере европейской территории России по сравнению со средними многолетними значениями (рис. 10, *а, б*). УФИ от $\sim 0,5$ –1 увеличился до ~ 2 , что, однако, не является критическим даже для людей с 1–2-м типами кожи (рис. 10, *в, г*).

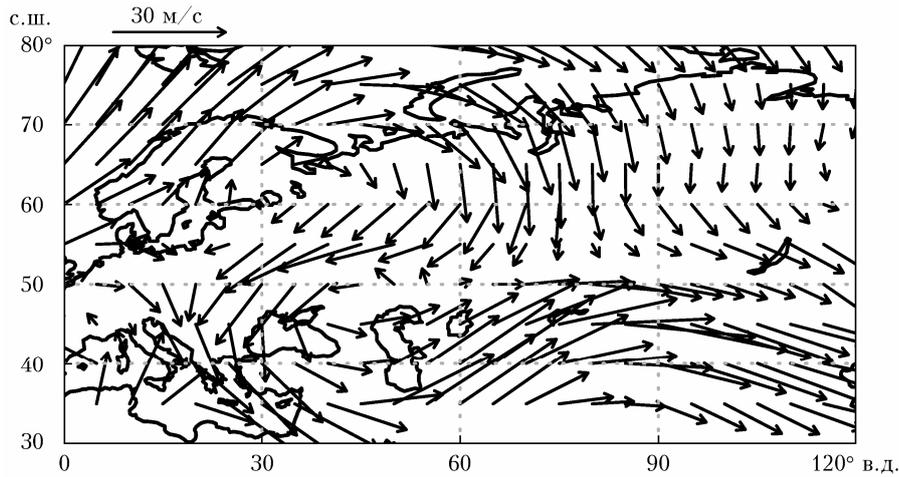


Рис. 9. Векторы ветра на уровне давления 500 гПа с 16 по 18 марта 2022 г.

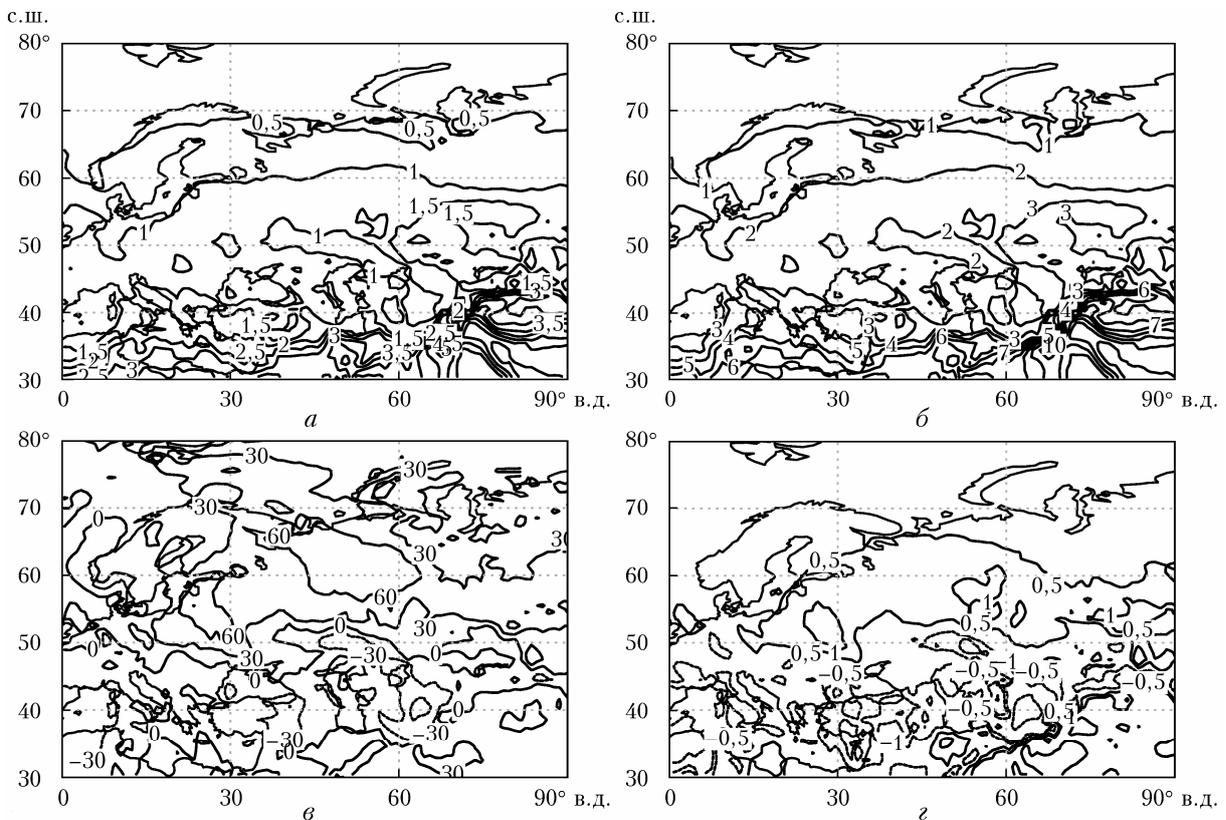


Рис. 10. Эритемная УФР с 16 по 18 марта 2022 г., Дж/м² (*а*); ее аномалии относительно многолетних средних значений, % (*б*); УФИ (*в*) и его аномалии относительно многолетних средних значений (*г*)

2.3. Облачность

Облачность оценивалась по спутниковым данным AIRS для дневного времени. Анализировалась доля покрытия небосвода облачностью: отношение количества пикселей с облаками к общему количеству пикселей. Сплошной облачности соответствуют близкие к единице значения, безоблачному небу – близкие к нулю.

Регионы ОМД к северо-востоку от Каспийского моря 22–24 мая 2021 г. (рис. 11, а) и ОМД на севере европейской территории России 16–18 марта 2022 г. (рис. 11, б) характеризовались пониженной облачностью.

Данные наземных метеостанций (<https://gr5.ru/>) подтверждают пониженную облачность в областях ОМД. Например, к северо-востоку от Каспийского моря в г. Оренбурге 22–24 мая 2021 г. существенной облачности не наблюдалось, так же как и в Череповце и Котласе на севере европейской территории России 16–18 марта 2022 г.

2.4. Модельные расчеты

Для условий безоблачного неба и местного полуденного времени с использованием спутниковых данных ОСО и спектральной модели [39] рассчитаны изменения УФИ с 22 по 24 мая 2021 г. для следующих крупных городов, находившихся в области ОМД:

Самара (53,2° с.ш., 50,1° в.д.), Оренбург (51,7° с.ш., 55° в.д.), Уфа (54,7° с.ш., 55,9° в.д.), Челябинск (55,1° с.ш., 61,4° в.д.) и Тюмень (57,1° с.ш., 65,5° в.д.) (табл. 1), а также с 16 по 18 марта 2022 г.: Череповец (59,1° с.ш., 37,9° в.д.), Вологда (59,2° с.ш., 39,8° в.д.), Котлас (61,2° с.ш., 46,6° в.д.) и Печора (65,1° с.ш., 57,2° в.д.) (табл. 2).

Результаты модельных расчетов подтвердили существенное увеличение УФР, выявленное ранее по спутниковым наблюдениям, особенно для ОМД с 22 по 24 мая 2021 г., когда для рассматриваемых городов (кроме Тюмени) УФИ достиг 8–9, что превышает пороговые значения для людей с преобладающим в этих регионах и в целом в России 1–3-м типами кожи.

В период ОМД с 16 по 18 марта 2022 г. УФИ увеличился в ~1,5 раза и превысил пороговые значения для людей с 1–2-м типами кожи, но остался ниже пороговых значений для людей с 3-м типом.

На результаты модельных расчетов, кроме значений ОСО и облачности, влияет альbedo подстилающей поверхности и аэрозольная оптическая толщина (АОТ). Для рассматриваемых ОМД расчеты проводились для безоблачных условий, учитывая спутниковые наблюдения. Так как изменения вертикальных профилей озона сильно не влияют на оценки УФР, использовались среднеклиматические вертикальные профили.

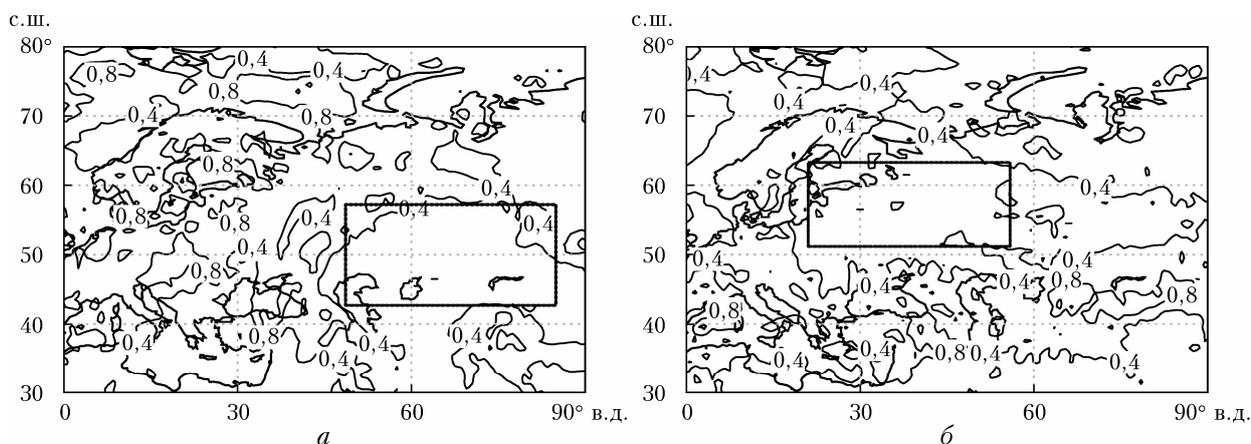


Рис. 11. Доля покрытия неба облачностью 22–24 мая 2021 г. (а) и 16–18 марта 2022 г. (б); рамками выделены области ОМД

Таблица 1

ОСО и УФИ в области ОМД с 22 по 24 мая 2021 г.

Параметр	Город				
	Самара	Оренбург	Уфа	Челябинск	Тюмень
Климатические значения ОСО, е.Д.	354	350,6	359,1	365	375
Климатические значения УФИ	5,2	6	5,1	4,7	4
ОСО по данным наблюдений	287	265	274	285	307
УФИ по данным наблюдений	6,1	8,5	7,5	7,1	5,6
Климатические значения УФИ по данным моделирования	6,5	6,6	6,2	5,9	5,3
УФИ по данным моделирования	8,3	9,2	8,5	7,9	6,7
Изменение УФИ относительно климатических значений:					
по данным наблюдений	1,1	1,41	1,47	1,51	1,4
по данным моделирования	1,3	1,4	1,4	1,3	1,3

ОСО и УФИ в области ОМД с 16 по 18 марта 2022 г.

Параметр	Город			
	Череповец	Вологда	Котлас	Печора
Климатические значения ОСО, е.Д.	400,6	399	399	406
Климатические значения УФИ	1,4	1,3	1	0,7
ОСО по данным наблюдений	277,5	265,8	256,2	235,4
УФИ по данным наблюдений	2	2	1,8	1,1
Климатические значения УФИ по данным моделирования	1,8	1,9	1,6	1,1
УФИ по данным моделирования	2,7	2,9	2,6	1,9
Изменение УФИ относительно климатических значений:				
по данным наблюдений	1,42	1,53	1,8	1,57
по данным моделирования	1,5	1,5	1,6	1,7

Аналогично выбранным параметрам при исследовании изменений УФР в период ОМД в феврале – марте 2015 г. [25] в модельных расчетах для марта 2022 г. использовались значения альbedo снежной поверхности 0,7 и АОТ = 0,05, а для мая 2021 г. альbedo почвы 0,1 и такая же АОТ, как для марта. Если предположить, что АОТ в мае больше, например, в четыре раза, то УФИ уменьшится на ~20%. Важно, что изменение АОТ может привести к изменению модельных оценок УФИ, но отношение их значений в конкретный период к климатическим значениям останется стабильным (с учетом рассматриваемой практически безаэрозольной атмосферы).

3. Влияние арктического стратосферного полярного вихря

На формирование ОМД весной в средних широтах может влиять распространение обедненных озоном воздушных масс из области арктического стратосферного полярного вихря. Зимний сезон 2020/2021 г. характеризовался стратосферным полярным вихрем, ослабленным в начале января в результате главного ВСП, сопровождающегося изменением направления среднезонального ветра в средней стратосфере и продолжавшегося около трех недель. После ВСП и до завершения зимнего сезона температура внутри стратосферного полярного вихря оставалась выше необходимой для образования полярных стратосферных облаков, что предотвратило разрушение озонового слоя [40].

Зима 2021/2022 г. характеризовался очень сильным стратосферным полярным вихрем в январе – феврале, одной из причин которого было наименьшее за последние 30 лет распространение волновой активности из тропосферы в стратосферу [41]. Последовавшие два минорных ВСП в конце февраля и начале марта 2022 г. привели к росту температуры стратосферы Арктики и ослаблению стратосферного полярного вихря. Эти ВСП и главное ВСП 20 марта предотвратили сильное разрушение озонового слоя.

Таким образом, на формирование ОМД в мае 2021 г. и в марте 2022 г. не влияло разрушение озонового слоя в стратосфере Арктики.

Заключение

Анализ характеристик и механизмов формирования ОМД, проведенный на основе спутниковых наблюдений AIRS/AMSU и данных реанализа NCEP, над центральной и южной частью Поволжья, югом Урала и Западной Сибири с 22 по 24 мая 2021 г. и на севере европейской территорией России и севером Урала с 16 по 18 марта 2022 г. свидетельствует о связи формирования ОМД с блокирующими антициклонами и подъемом высоты тропопаузы, а также переносом из субтропиков в северном направлении воздушных масс с меньшим содержанием озона в верхней тропосфере – нижней стратосфере на западной периферии антициклона.

С 22 по 24 мая 2021 г. в области ОМД аномалии ОСО составили ~20% от средних значений за период 2003–2021 гг., высота тропопаузы увеличилась на ~1,5 км; положительные аномалии биологически активной (эритемной) дозы УФР достигли 40–60%, УФИ увеличился от ~6 до ~8.

С 16 по 18 марта 2022 г. в области ОМД аномалии ОСО составляли до ~40%, увеличение высоты тропопаузы – ~2,5 км, положительные аномалии эритемной дозы УФР достигали 40–60%, УФИ вырос до ~2.

Проведенные модельные расчеты для полуденного времени и безоблачных условий подтвердили увеличение УФР вследствие формирования ОМД. С 22 по 24 мая 2021 г. УФИ увеличился в ~1,3 раза до 7–9, значительно превысив пороговые значения для людей с преобладающими в России типами кожи (1–3). С 16 по 18 марта 2022 г. УФИ увеличился в ~1,5 раза, однако его значения превысили пороговые для людей только с 1-м и 2-м типами кожи, но остались ниже пороговых значений для людей с 3-м типом кожи.

Таким образом, анализ спутниковых наблюдений и модельных расчетов для двух эпизодов ОМД над территорией России продолжительностью трое суток показал, что они могут приводить к увеличению приземной УФР. Этот эффект сильнее проявился для ОМД к северо-востоку от Каспийского моря в период с более высоким Солнцем с 22 по 24 мая 2021 г.

ОМД 22–24 мая 2021 г. сопровождалась среднесуточной температурой до 20–25°С с положительными аномалиями до 6–8°С в центральной и южной частях Поволжья, Урала и Западной Сибири. В период ОМД 16–18 марта 2022 г. температура на севере европейской территории России составляла от –5 до –10°С, а положительные аномалии 3–6°С. Возможный негативный эффект роста УФР может усилиться из-за повышенной температуры, способствующей увеличению времени нахождения и количества людей вне помещений, включая имеющих наиболее уязвимые к УФР типы кожи, и с меньшим покрытием тела одеждой.

Финансирование. Анализ метеорологических условий выполнен при поддержке проекта РНФ № 19-17-0024, исследование последствий формирования озоновых «мини-дыр» поддержано проектом РФФИ № 20-55-14003.

Список литературы

1. *Fioletov V.E.* Ozone climatology, trends, and substances that control ozone // *Atmosphere – Ocean*. 2008. N 46:1. P. 39–67.
2. *WMO.* Executive Summary of Scientific Assessment of Ozone Depletion. 2022. WMO: Geneva, Switzerland, 2022.
3. *Barnes P.W., Robson T.M., Neale P.J., Williamson C.E., Zepp R.G., Madronich S., Wilson S.R., Andrady A.L., Heikkilä A.M., Bernhard G.H., Bais A.F., Neale R.E., Bornman J.F., Jansen M.A., Klekociuk A.R., Martinez-Abadigar J., Robinson S.A., Wang Q-W., Banaszak A.T., Häder D.-P., Hylander S., Rose K.C., Wängberg S.-Å., Foerid B., Hou W.-C., Ossola R., Paul N.D., Ukpebor J.E., Andersen M.P., Longstreth J., Schikowski T., Solomon K.R., Sulzberger B., Bruckman L.S., Pandey K.K., White C.C., Zhu L., Zhu M., Aucamp P.J., Liley J.B., McKenzie R.L., Berwick M., Byrne S.N., Hollestein L.M., Lucas R.M., Olsen C.M., Rhodes L.E., Yazar S., Young A.R.* Environmental effects of stratospheric ozone depletion, UV radiation, and interactions with climate change: UNEP Environmental Effects Assessment Panel, Update 2021 // *Photochem. Photobiol. Sci.* 2022. V. 21. P. 275–301.
4. *Manney G., Santee M., Rex M., Livesey N., Pitts M., Veefkind P., Nash E., Wohltmann I., Lehmann R., Froidevaux L., Poole L., Schoeberl M., Haffner D., Davies J., Dorokhov V., Gernandt H., Johnson B., Kivi R., Kyrö E., Larsen N., Levelt P., Makshtas A., McElroy C., Nakajima H., Parrondo M., Tarasick D., von der Gathen P., Walker K., Zinoviev N.* Unprecedented Arctic ozone loss in 2011 // *Nature*. 2011. V. 478. P. 469–475.
5. *Цветкова Н.Д., Варгин П.Н., Лукьянов А.Н., Кирюшов Б.М., Юшков В.А., Хамматов В.У.* Исследование химического разрушения озона и динамических процессов в стратосфере Арктики зимой 2019–2020 г. // *Метеорол. и гидрол.* 2021. № 9. С. 70–83.
6. *Smyshlyaev S.P., Vargin P.N., Motsakov M.A.* Numerical modeling of ozone loss in the exceptional Arctic stratosphere winter–spring of 2020 // *Atmosphere*. 2021. V. 12. P. 1470.
7. *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.
8. *Bernhard G.H., Fioletov V.E., Groß J.-U., Ialongo I., Johnsen B., Lakkala K.* Record-breaking increases in Arctic solar ultraviolet radiation caused by exceptionally large ozone depletion in 2020 // *Geophys. Res. Lett.* 2020. V. 47. P. e2020GL090844.
9. *Karpechko A., Backman L., Thölix L., Ialongo I., Andersson M., Fioletov V., Heikkilä A., Johnsen B., Koskela T., Kyrö E., Lakkala K., Myhre C., Rex M., Sofieva V., Tamminen J., Wohltmann I.* The link between springtime total ozone and summer UV radiation in Northern Hemisphere extratropics // *J. Geophys. Res.* 2013. V. 118. P. 8649–8661.
10. *Pinault L., Fioletov V.* Sun exposure, sun protection and sunburn among Canadian adults // *Statistics Canada, Catalogue No. 82-003-X. Health Reports*. 2017. V. 28, N 5. P. 12–19.
11. *Gershenwald J.E., Guy G.P.* Stemming the rising incidence of melanoma: Calling prevention to action // *J. Nat. Cancer Institute*. 2015. V. 108, N 1. DOI: 10.1093/jnci/djv381.
12. *Злокачественные новообразования в России в 2020 году (Заболеваемость и смертность)* / под ред. А.Д. Каприна, В.В. Старинского. М.: Моск. науч.-исслед. онколог. ин-т им. П.А. Герцена, 2021. 252 с.
13. *Czerwińska A.E., Krzyścin J.W.* Climatological aspects of the increase of the skin cancer (melanoma) incidence rate in Europe // *Int. J. Climatol.* 2019. V. 40, N 6. P. 3196–3207.
14. *Egorova T., Rozanov E., Gröbner J., Hauser M., Schmutz W.* Montreal protocol benefits simulated with CCM SOCOL // *Atmos. Chem. Phys.* 2013. V. 3. P. 3811–3823.
15. *Ball W., Alsing J., Mortlock D., Staehelin J., Haigh J., Peter T., Tummon F., Stäbi R., Stenke A., Anderson J., Bourassa A., Davis S., Degenstein D., Frith S., Froidevaux L., Roth C., Sofieva V., Wang R., Wild J., Yu P., Ziemke J., Rozanov E.* Evidence for a continuous decline in lower stratospheric ozone offsetting ozone layer recovery // *Atmos. Chem. Phys.* 2018. V. 18. P. 1379–1394.
16. *Pommereau J.-P., Goutail F., Pazmino A., Lefuvre F., Chipperfield M.P., Feng W., Roozendael M. V., Jepsen N., Hansen G., Kivi R., Bognar K., Strong K., Walker K., Kuzmichev A., Khattatov S., Sitnikova V.* Recent Arctic ozone depletion: Is there an impact of climate change? // *C. R. Geosci.* 2018. V. 350. P. 347–353.
17. *Zubov V., Rozanov E., Egorova T., Karol I., Schmutz W.* Role of external factors in the evolution of the ozone layer and stratospheric circulation in 21st century // *Atmos. Chem. Phys.* 2013. V. 13. P. 4697–4706.
18. *Чубарова Н.Е., Жданова Е.Ю., Хамматов В.У., Варгин П.Н.* Актуальные проблемы изучения ультрафиолетовой радиации и озонового слоя // *Вестн. РАН*. 2016. Т. 86, № 9. С. 839–846.
19. *Gathen P., Kivi R., Wohltmann I., Salawitch R., Rex M.* Climate change favours large seasonal loss of Arctic ozone // *Nature Commun.* 2021. V. 12. P. 1–17.
20. *Vargin P.N., Kostykin S.V., Volodin E.M., Pogoreltsev A.I., Wei K.* Arctic stratosphere circulation changes in the 21st century in simulations of INM CM5 // *Atmosphere*. 2022. V. 13, N 25. DOI: 10.3390/atmos13010025.
21. *James P.M.* A Climatology of ozone mini-holes over the Northern Hemisphere // *Int. J. Climatol.* 1998. V. 18. P. 1287–1303.

22. Peters D., Egger J., Entzian G. Dynamical aspects of ozone mini-hole formation // Meteorol. Atmos. Phys. 1995. V. 55. P. 205–214.
23. Timofeyev Y., Smyshlyaev S., Virolainen Y., Garkusha A.S., Polyakov A.V., Motsakov M.A., Kirner O. Case study of ozone anomalies over northern Russia in the 2015/2016 winter: Measurements and numerical modeling // Ann. Geophys. 2018. V. 36. P. 1495–1505.
24. Ситнов С.А., Мохов И.И. Связь озоновой «минидыры» над Сибирью в январе 2016 г. с атмосферным блокированием // Док. РАН. Науки о Земле. 2021. Т. 500, № 1. С. 77–82.
25. Чубарова Н.Е., Тимофеев Ю.М., Виролайнен Я.А., Поляков А.В. Оценки УФ-индексов в периоды пониженного содержания озона над Сибирью зимой – весной 2016 г. // Оптика атмосф. и океана. 2018. Т. 31, № 11. С. 902–905; Чубарова Н.Е., Тимофеев Ю.М., Virolainen Ya.A., Polyakov A.V. Estimates of UV indices during the periods of reduced ozone content over Siberia in winter–spring 2016 // Atmos. Ocean. Opt. 2019. V. 32, N 2. P. 177–179.
26. Ситнов С.А., Мохов И.И. Особенности поля общего содержания озона при атмосферном блокировании над Европейской территорией России летом 2010 г. (по спутниковым данным) // Метеорол. и гидрол. 2016. № 1. С. 41–52.
27. Мохов И.И., Тимажев А.В. Атмосферные блокирования и изменения их повторяемости в XXI веке по расчетам с ансамблем климатических моделей // Метеорол. и гидрол. 2019. № 6. С. 5–16.
28. Barriopedro D., Anto M., Garcia J.A. Atmospheric blocking signatures in total ozone and ozone miniholes // J. Clim. 2010. V. 23. P. 3967–3983.
29. Иванова Н.С., Кузнецова И.Н., Лезина Е.А. Содержание озона над территорией Российской Федерации во втором квартале 2021 г. // Метеорол. и гидрол. 2021. № 8. С. 135–142.
30. Иванова Н.С., Кузнецова И.Н., Лезина Е.А. Содержание озона над территорией Российской Федерации в первом квартале 2022 г. // Метеорол. и гидрол. 2022. № 6. С. 137–143.
31. Acker J.G., Leptoukh G. Online analysis enhances use of NASA Earth Science Data // EOS. Trans. Am. Geophys. Union. 2007. V. 8, N 2. P. 14–17.
32. Aumann H.H., Chahine M.T., Gautier C., Goldberg M.D., Kalnay E., McMillin L.M., Revercomb H., Rosenkranz P.W., Smith W.L. AIRS/AMSU/HSB on the Aqua mission: Design, science objectives, data products, and processing systems // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2003. V. 41. P. 253–264.
33. Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L., Iredell M., Saha S., White G., Woollen J., Zhu Y., Chelliah M., Ebisuzaki W., Higgins W. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project // Bull. Am. Meteorol. Soc. 1996. V. 77. P. 437–470.
34. Chubarova N., Zhdanova E. Ultraviolet resources over northern Eurasia // J. Photochem. Photobiol. B: Biology. 2022. V. 127. P. 8–51.
35. Zhang H., Wang J., Castro Garcia L., Zeng J., Denhardt C., Liu Y., Krotkov N.A. Surface erythemal UV irradiance in the continental United States derived from ground-based and OMI observations: Quality assessment, trend analysis and sampling issues // Atmos. Chem. Phys. 2019. V. 19. P. 2165–2181.
36. Vanicek K., Frei T., Litynska Z., Schmalwieser A. UV Index for the Public. Brussels: European Communities, 2000. 26 p.
37. Fitzpatrick T.B. The validity and practicality of sunreactive skin types I through VI // Arch. Dermatol. 1988. V. 124. P. 869–871.
38. WMO. URL: [https://www.who.int/ru/news-room/questions-and-answers/item/ultraviolet-\(uv\)-index](https://www.who.int/ru/news-room/questions-and-answers/item/ultraviolet-(uv)-index).
39. Фомин Б.А., Колокутин Г.Э. Эффективные параметризации поглощения биологически активной УФ-радиации атмосферным озоном // Оптика атмосф. и океана. 2017. Т. 30, № 7. С. 621–627; Fomin B.A., Kolokutin G.E. Effective parameterizations of biologically active UV radiation absorption by atmospheric ozone // Atmos. Ocean. Opt. 2017. V. 30, N 6. P. 495–501.
40. Варгин П.Н., Гурьянов В.В., Лукьянов А.Н., Вязанкин А.С. Динамические процессы стратосферы Арктики зимой 2020–2021 г. // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 2021. Т. 57, № 6. С. 651–664.
41. Vargin P.N., Koval A.V., Guryanov V.V. Arctic stratosphere dynamical processes in the winter 2021–2022 // Atmosphere. 2022. V. 13. P. 1550.

P.N. Vargin, B.A. Fomin, V.A. Semenov. Influence of ozone mini-holes over Russian territories in May 2021 and March 2022 revealed in satellite observations and simulation.

The mechanisms of the formation of ozone mini-holes (OMHs) and their influence on the levels of UV radiation (UVR) over May 22–24, 2021, in the middle and southern parts of the Volga region and the south of the Urals and Western Siberia and over March 16–18, 2022, in the northwest of the European of Russia are studied using data from the AIRS satellite infrared spectrometer and NCEP reanalysis. It is shown that the formation of these OMHs is due to the increase in the tropopause level associated with the anticyclone and the transfer of low-ozone air masses from the subtropics. In the first period of the OMH, negative total ozone (TO) anomalies were up to ~20% of the average values from 2003 to 2021, and positive UVR anomalies attained 40–60%, the UV index increased from ~6 to ~8. In the second period, in the region of the OMH with negative TO anomalies up to ~-40%, positive UVR anomalies attained 40–60%, and the UV index increased from ~1 to ~2. Calculations with an original spectral model, which allows solving the transport equation at a single point, confirmed the increase in UVR revealed in satellite observations in the OMH regions.

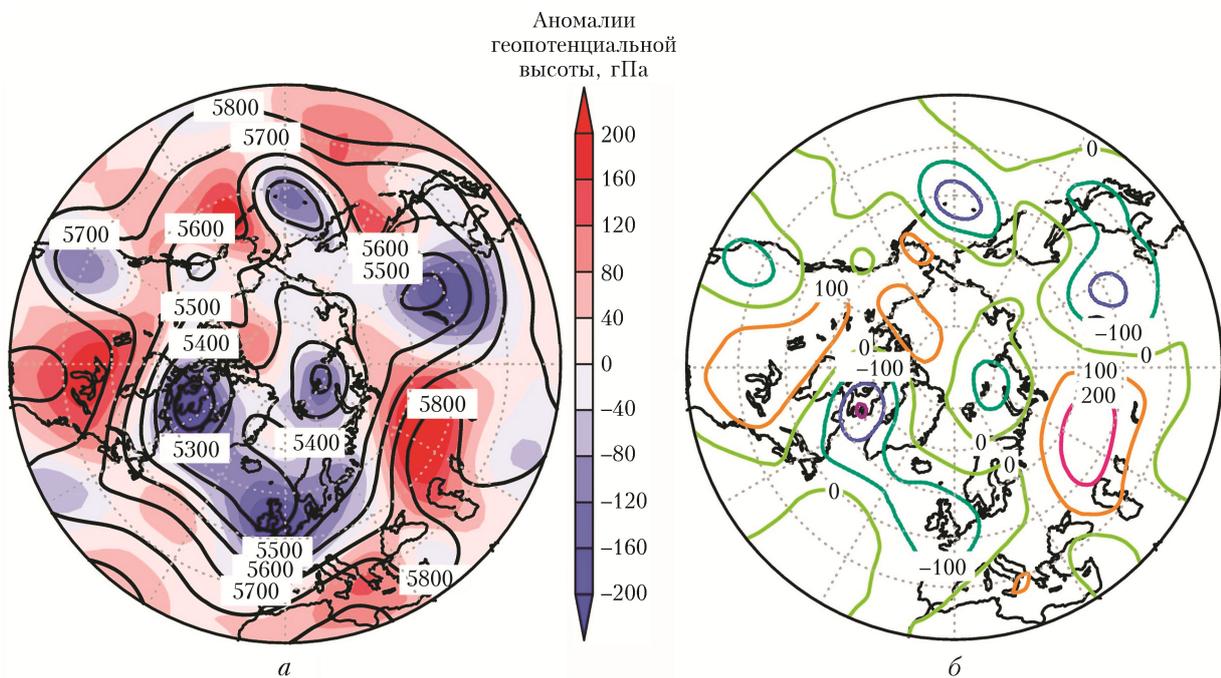


Рис. 3. Геопотенциальная высота на уровне 500 гПа и ее аномалии относительно климатических значений (*a*); отклонение геопотенциальной высоты от среднесезональных значений (*б*) с 22 по 24 мая 2021 г.

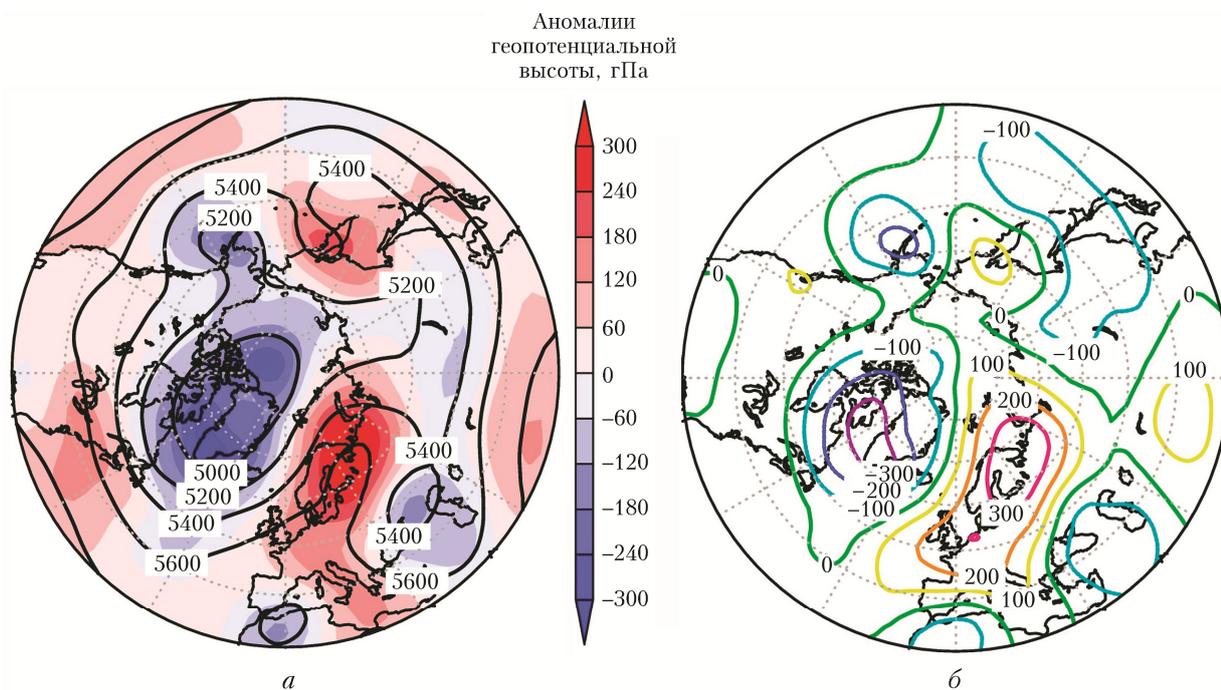


Рис. 8. То же, что и на рис. 3, с 16 по 18 марта 2022 г.