

УДК 551.521.17

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ОЗОНА, ЭРИТЕМНОЙ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОЙ РАДИАЦИИ И УФ РЕСУРСОВ НАД ТЕРРИТОРИЕЙ СЕВЕРНОЙ ЕВРАЗИИ В XXI ВЕКЕ

© 2019 г. А. С. Пастухова<sup>1\*</sup>, Н. Е. Чубарова<sup>1\*\*</sup>, Е. Ю. Жданова<sup>1</sup>,  
В. Я. Галин<sup>2\*\*\*</sup>, С. П. Смышляев<sup>3\*\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова  
119991 Москва, ГСП-1, Ленинские горы, 1

E-mail: \*p-annet@mail.ru

\*\*natalia.chubarova@gmail.com

<sup>2</sup>Институт вычислительной математики РАН

119991, Москва, ул. Губкина, 8

\*\*\*E-mail: venergalin@yandex.ru

<sup>3</sup>Российский государственный гидрометеорологический университет  
192007, Санкт-Петербург, Воронежская ул., 79

\*\*\*\*E-mail: smyshl@rshu.ru

Поступила в редакцию 25.09.2018 г.

Принята к печати 06.02.2019 г.

С помощью химико-климатической модели ИВМ РАН-РГГМУ (ХКМ ИВМ-РГГМУ) проанализировано действие различных факторов на общее содержание озона (ОСО) и эритемную УФ радиацию ( $Q_{ery}$ ) на территории Северной Евразии за период с 1979 по 2059 гг. Оценена чувствительность моделирования содержания озона к заданию разных входных данных температуры поверхности океана (ТПО). В зависимости от используемых ТПО наблюдаются большие различия в трендах ОСО. Результаты модельного эксперимента, учитывающего изменения антропогенных выбросов галогенсодержащих веществ, свидетельствуют о нелинейном уменьшении  $Q_{ery}$  за счет восстановления озонового слоя в XXI в. В 2016–2020 гг. значения  $Q_{ery}$  на 2–5% выше относительно уровня 1979–1983 гг. в среднем по всей северной Евразии с максимумом порядка 6% в полярных широтах. В 2035–2039 гг. величина  $Q_{ery}$  выравнивается, а дальше постепенно снижается относительно значений за 1979–1983 гг. на 4–6% в азиатской части и на 6–8% над северной Европой в 2055–2059 гг. По этой причине наблюдается изменение границ классов УФ ресурсов. Наибольшие изменения в пространственном распределении УФ ресурсов будут наблюдаться весной и летом: эти изменения проявляются в расширении областей УФ недостаточности на севере и сокращение областей УФ избыточности на юге.

**Ключевые слова:** ультрафиолетовая радиация, озон, облачное пропускание УФ радиации, химико-климатическое моделирование.

**DOI:** <https://doi.org/10.31857/S0002-351555320-28>

### ВВЕДЕНИЕ

Ультрафиолетовая радиация играет важную роль в атмосферных процессах, а также влияет на природные экосистемы и здоровье человека [26, 30]. Наиболее опасной для человека является эритемная радиация ( $Q_{ery}$ ), которая имеет максимальную изменчивость в диапазоне 280–315 нм и в больших дозах может привести к развитию рака кожи и других заболеваний. Связанные с проблемой истощения озонового

слоя исследования изменения  $Q_{ery}$  у поверхности Земли особенно актуальны и представлены во многих международных обзорах и оценочных докладах [4, 27, 30].

Для оценок изменения УФ радиации в прошлом, настоящем и будущем активно используются химико-климатические модели [1, 12, 14, 15, 29], которые позволяют проводить исследования изменчивости содержания атмосферного озона и, соответственно, УФ радиации

с учетом обратных связей между химическим составом атмосферы и метеорологическими параметрами. В работе [21] рассмотрены возможные изменения озонового слоя и УФ радиации в будущем, если бы Монреальский протокол не был принят. В работе [13] представлены проекции изменения общего содержания озона и эритемной УФ радиации в XXI в. с использованием химико-климатической модели SOCOL для разных сценариев антропогенных выбросов озоноразрушающих веществ. Однако в этих работах рассматриваются зонально осредненные величины или весь земной шар в целом. В исследовании [5] более детально представлен прогноз изменений  $Q_{ery}$  с 2006 по 2100 гг. для территории Европы, но для территории России и Евразии в целом таких исследований еще не было проведено. В выполненных работах рассматривается, главным образом, антропогенное воздействие, приводящее к изменению концентрации озона и УФ радиации у поверхности Земли. Природным факторам, влияющим на изменение озона, внимания уделяется меньше, хотя современные исследования [6, 17, 24] свидетельствуют, в частности, о существенном влиянии температуры поверхности океана (ТПО) на динамику нижней стратосферы и, как следствие, на распределение озона и УФ радиации. Поскольку существующие работы базируются только на каком-то одном источнике данных, в данной работе было решено провести эксперименты с различными данными о ТПО.

Следует также отметить, что для ХКМ, с помощью которых проводился прогноз УФ радиации за счет предполагаемого восстановления озонового слоя, обычно не проводилась оценка изменений УФ радиации за счет облачности [23, 28], поскольку ХКМ не воспроизводят надежно тренды облачности. В работе [3] также показано, что и в ХКМ ИВМ-РГГМУ не полностью воспроизводятся реально наблюдающиеся тренды облачности. В модели они близки к нулю, в то время как в реальности в ряде регионов наблюдаются существенные изменения облачного покрова [6]. Ни в одной из указанных работ не проводилась и оценка возможных изменений УФ ресурсов.

Цель данной работы заключается в анализе вариаций  $Q_{ery}$  у земной поверхности и УФ ресурсов с 1979 г. до конца XXI в. на территории северной Евразии по данным химико-климатического моделирования, а также в выявлении роли основных геофизических факторов во временной изменчивости УФ радиации на основе новых численных экспериментов.

## МЕТОДИКА

Эксперименты проводились с помощью глобальной трехмерной химико-климатической модели Института вычислительной математики РАН и Российского государственного гидрометеорологического университета (ХКМ ИВМ-РГГМУ) с шагом сетки  $5^\circ$  по долготе и  $4^\circ$  по широте и охватывающей слой атмосферы от 0 до 90 км. Временной шаг модели составляет 12 мин, а анализу подвергались среднемесячные значения. Химический блок модели включает в себя 74 основных газовых составляющих атмосферы, которые имеют прямое или косвенное влияние на фотохимические изменения озона в разных слоях атмосферы [1].

В работе исследовалось влияние отдельных факторов на вариации озона и облачного пропускания, а также воздействие суммы всех факторов на УФ радиацию. Антропогенный фактор был учтен через выбросы озоноразрушающих веществ — фреонов и галлонов, заданных согласно сценарию 2010 WMO Ozone Assessment Scenario A1 [30]. Рассматривались вариации нескольких естественных факторов: солнечной активности, стратосферного аэрозоля, температуры поверхности океана и площади покрытия льдом (ППЛ). Влияние солнечной активности учитывалось заданием межгодовой и сезонной изменчивости спектральных потоков солнечной радиации по данным архива LISIRD, сформированным на базе измерений спутниковых приборов (SORCE, SDO, TIMED и др.) по [11]. Данные по стратосферному аэрозолю включают в себя временные серии, охватывающие период с двумя наиболее мощными вулканическими извержениями конца 20 века — Эль-Чичон (1982 г.) и Пинатубо (1991 г.) [25]. Температура поверхности океана и ППЛ при базовом расчете задавалась по данным реанализа Met Office Hadley Centre [22], начиная с 1970 г. (спинап, т. е. согласование полей начальных данных модели, до 1979 г.). Базовым сценарием являлся сценарий с индексом 1A, в котором учитывались изменения всех факторов до 2015 г., а после — только выбросы озоноразрушающих веществ согласно принятым сценариям [30]. Для оценки влияния разных ТПО и ППЛ проводились специальные эксперименты по данным реанализа ERA-INTERIM (1B) [9], а также использовались данные химико-климатической модели SOCOL (1C) [23]. Данные модели SOCOL базируются на среднемесячных дан-

ных ТПО Met Office Hadley Centre и включают в себя прогноз изменений ТПО до конца XXI в. В данной работе детально рассмотрено влияние ТПО и ППЛ на изменения общего содержания озона.

В силу ограниченности машинных ресурсов и неточности метода  $\delta$ -Эддингтона, использующегося в ХКМ ИВМ-РГГМУ, для тех длин волн в УФ диапазоне, где наблюдается существенное поглощение озоном, вариации эритемной УФ радиации рассчитывались с помощью радиационного фактора усиления за счет ОСО, характеризующего относительное изменение  $Q_{ery}$  при единичном относительном изменении ОСО. В многочисленных работах [4, 8, 18, 19] было показано, что данная методика дает удовлетворительные результаты расчетов относительного изменения  $Q_{ery}$ . Для уменьшения погрешностей расчета дополнительно учитывалась зависимость радиационного фактора усиления от высоты Солнца по формуле [8]:

$$RAF(h) = -1.10 \times 10^{-4} \times h^2 + 1.57 \times 10^{-2} \times h + 0.665, \quad (1.1)$$

где  $h$  — высота Солнца.

В работе рассматривалась относительная изменчивость УФ радиации, которая рассчитывалась с учетом нормировки на средние значения за рассматриваемый период. Поскольку отклонения величины УФ радиации за счет озона малы, то можно использовать линейное приближение. Тогда отклонение  $Q_{ery}$  за отдельный год можно рассчитать как:

$$\frac{Q_{ery_i} - Q_{ery_{mean}}}{Q_{ery_{mean}}} = \left( \frac{x_i - x_{mean}}{x_i} \right) RAF(h), \quad (1.2)$$

где  $Q_{ery_i}$  — величина за  $i$ -й год,  $Q_{ery_{mean}}$  — средняя величина за рассматриваемый период,  $X_i$  — общее содержание озона за отдельный год,  $X_{mean}$  — среднее общее содержание озона за рассматриваемый период. При оценке RAF использовалась средняя за светлый период дня высота Солнца для 15 числа каждого месяца. В анализе рассматривались 5-летние средние значения для выбранных временных интервалов (1979–1983, 2016–2020, 2025–2029, 2035–2039, 2045–2049, 2055–2059 гг.).

В качестве параметра, учитывающего воздействие облачности на УФ радиацию, использовалась величина пропускания CQ, равная отношению УФ радиации в действительных условиях облачности к УФ радиации в безоблачных условиях. Эта величина учитывает как про-

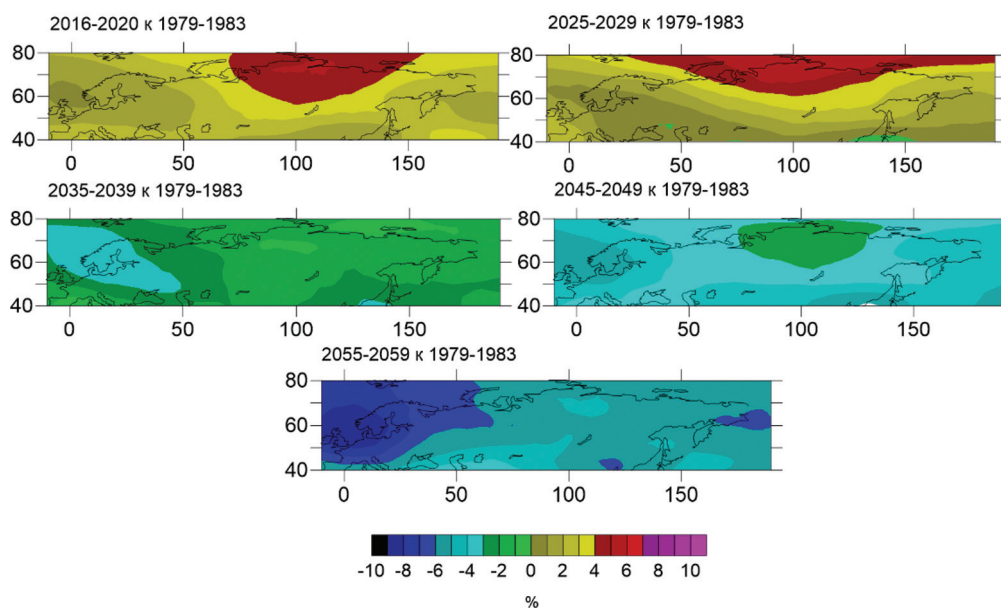
странственные, так и оптические характеристики облачности. Поскольку модель ИВМ-РГГМУ не достаточно хорошо воспроизводит тренды облачности, но удовлетворительно оценивает абсолютные величины УФ пропускания, то при анализе изменений УФ радиации учитывались только тренды озона, а при расчете УФ ресурсов — тренды озона и среднее ослабление УФ радиации облаками [3].

Расчет УФ ресурсов проводился на основании точных радиационных расчетов методом дискретных ординат в 8-ми потоковом приближении, подробно описанным в [7]. Данные по общему содержанию озона задавались по проведенным численным экспериментам с ХКМ ИВМ-РГГМУ. Для учета влияния облачности использовались средние климатические значения облачного пропускания за период 1979–2015 гг. и 2089–2099 гг., которые были практически одинаковыми. Данные по аэрозольной оптической толщине и альбедо поверхности задавались по данным, представленным в [7]. УФ ресурсы были рассчитаны для базового сценария в 1979–2015 гг. Поскольку сценарий 1А просчитан до 2059 г. для определения УФ ресурсов на конец XXI в. (2089–2099 гг.) был использован более ранний модельный расчет, начинающийся с 1979 г., без спада (1.1А). Сопоставление этих двух расчетов возможно, во-первых, потому что период проводимых расчетов достаточно долгий, и к концу расчетов (2089–2099 гг.) климатические поля в модели уже согласованы, во-вторых, потому что тенденции изменения озона в обоих вариантах аналогичные.

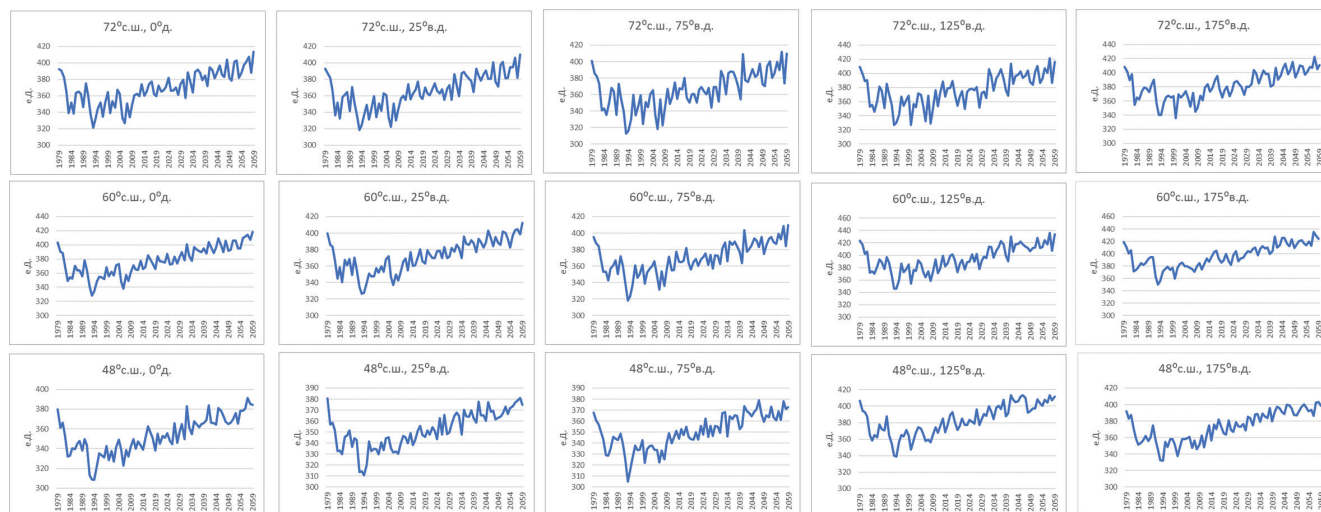
## РЕЗУЛЬТАТЫ

Модельные эксперименты до 2059 г. на основе базового варианта 1А(ТПО-MetOffice), учитывающего только антропогенные выбросы озоноразрушающих веществ, свидетельствуют об отрицательных трендах  $Q_{ery}$ . Это происходит за счет восстановления озонового слоя в XXI в. согласно действию Монреальского протокола. В 2016–2020 гг. значения  $Q_{ery}$  в среднем на 2–4% выше значений базового периода (1979–1983 гг.), в полярных районах — на 6%. В 2035–2039 гг. происходит снижение уровня  $Q_{ery}$ , и в последующие периоды 2045–2049 гг. и 2055–2059 гг. уровни  $Q_{ery}$  становятся меньше относительно значений 1979–1983 гг. в среднем на 4–6% по всей территории северной Евразии. Наибольшее снижение  $Q_{ery}$  наблюдается





**Рис. 1.** Изменение среднегодовых значений  $Q_{eqy}$  за различные периоды относительно значений 1979–1983 гг. по данным ХКМ ИВМ-РГМУ, в процентах, сценарий 1А(ТПО-MetOffice), влияние всех факторов до 2015 г., после 2015 – только выбросы озоноразрушающих веществ.

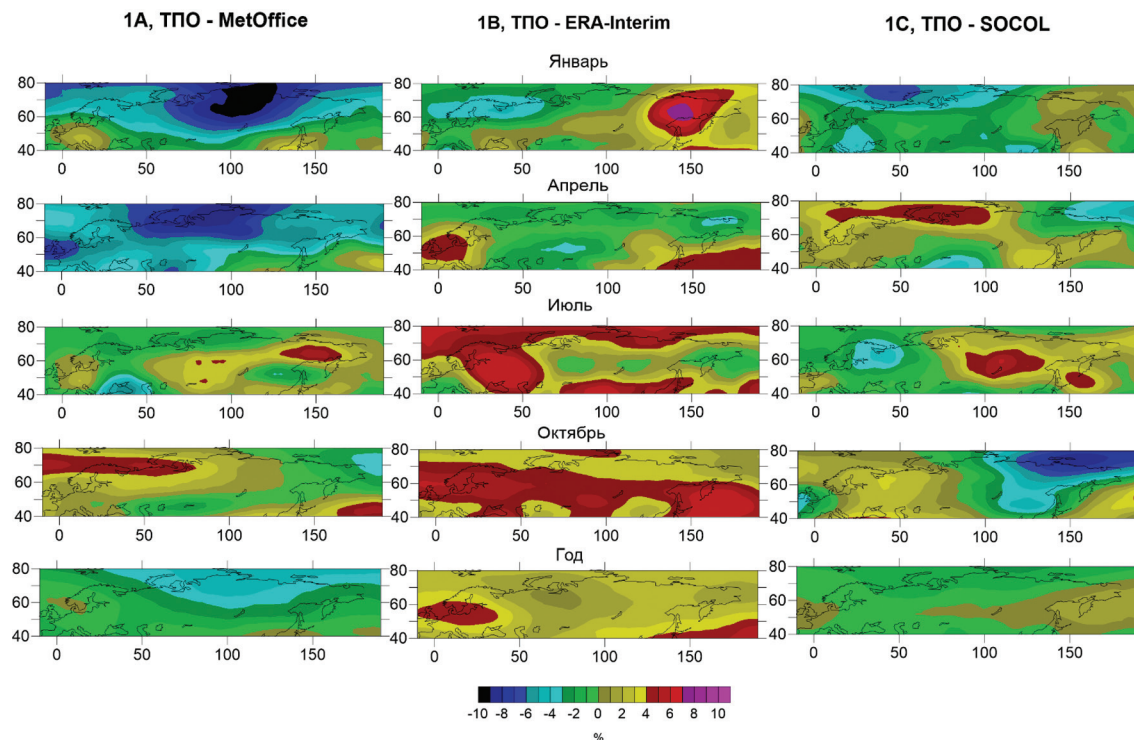


**Рис. 2.** Изменение ОСО в разных точках северной Евразии с координатами 48°, 60°, 72° с. ш. и 0°, 25°, 75°, 125°, 175° в. д., сценарий 1А(ТПО-MetOffice).

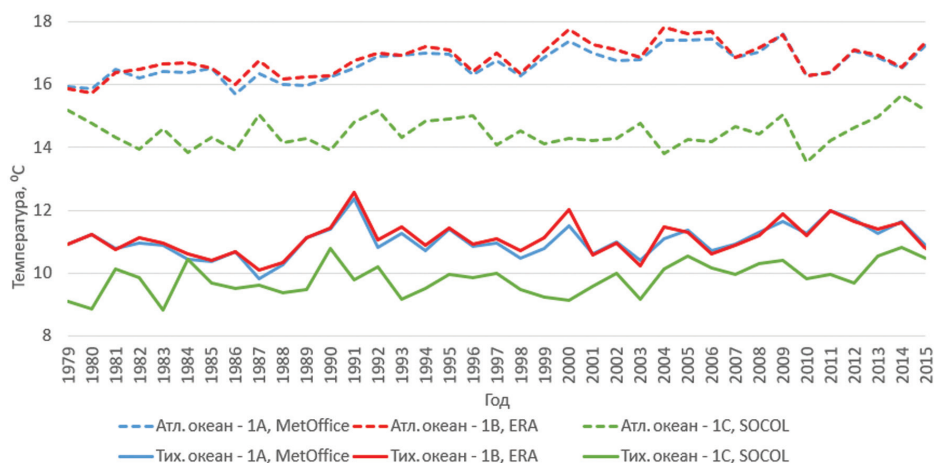
над европейской частью Евразии — на 6–8% относительно базового периода 1979–1983 гг. (рис. 1, 2).

При анализе экспериментов с 1979 по 2015 гг. в [6] было выявлено существенное влияние ТПО на изменения ОСО, особенно сильно проявлявшееся в полярных областях Северного полушария. Для того, чтобы более детально проанализировать влияние ТПО на ОСО, выполнены дополнительные модельные эксперименты с различными начальными данными о ТПО и ППЛ.

Получены довольно большие различия между расчетами ОСО в данных сценариях (рис. 3). Варианты 1А(ТПО-MetOffice) и 1С (ТПО-SOCOL) наиболее похожи между собой: отношения годовых средних значений ОСО в 2026–2030 гг. к 1979–1983 гг. имеют отрицательный знак практически на всей рассматриваемой территории и лежат в диапазоне от 0 до –4%. Результаты сценария 1В (ТПО-ERA-Interim) отличаются от двух других вариантов — отношение годовых средних значений ОСО повсеместно имеет положительный знак и изменяется от 0 до 5%.



**Рис. 3.** Изменение средних значений ОСО за 2026–2030 гг. относительно значений 1979–1983 гг. по данным ХКМ ИВМ-РГГМУ, в процентах. Варианты 1А(ТПО-MetOffice) и 1В(ТПО-ERA-Interim) учитывают влияние ТПО до 2015 г., далее — ТПО фиксировано на уровне 2015 г. ТПО для варианта 1С(ТПО-SOCOL) изменяется с 1979 по 2030 гг. согласно модельным данным SOCOL.



**Рис. 4.** Температура поверхности океана тихоокеанского (от 35° с. ш. до 50° с. ш., от 150° в. д. до 150° з. д.) и атлантического (от 35° с. ш. до 50° с. ш., от 45° з. д. до 55° з. д.) секторов для сценариев 1А(ТПО-MetOffice), 1В(ТПО-ERA-Interim), 1С(ТПО-SOCOL) с 1979 по 2015 гг., январь.

Полученные различия были проверены на соответствие волновой гипотезе о воздействии аномалий ТПО на изменения стратосферной циркуляции, предложенной в [2]. Она заключается в интерференции орографического и термического источников стационарных планетарных волн, в результате чего межгодовые изменения содержания озона в средних и высоких широтах Северного полушария, а также вари-

ции динамики полярного стратосферного вихря сильно связаны с разностью аномалий ТПО северной части Тихого океана (центр действия южнее Алеутских островов) и Атлантики (центр действия вблизи Ньюфаундленда) и наиболее ярко проявляются в зимне-весенний период.

На рис. 4 показаны январские ТПО для морских секторов, которые согласно [2] имеют наибольшее влияние на изменения ОСО

в Северном полушарии. Видно, что разность ТПО в Тихоокеанском и Атлантическом секторах для всех наборов данных примерно одинакова, что не объясняет имеющихся различий в изменениях ОСО. Различия между этими сценариями могли возникнуть также потому, что вариации ТПО в варианте 1С (ТПО-SOCOL) задаются для всего периода с 1979 по 2030 г., а в вариантах 1А (ТПО-MetOffice) и 1В (ТПО-ERA-Interim) только с 1979 по 2015 г., а далее фиксируются на уровне 2015 г. Возможно, наличие тренда ТПО с 2015 по 2030 г. в варианте 1С (ТПО-SOCOL) способствует накоплению ОСО в полярных районах зимой и весной, не наблюдающемуся в варианте 1А. В варианте 1А (ТПО-MetOffice) перенос ОСО ослабевает, и к 2030 г. озона в высоких широтах в зимнее время становится меньше. Хотя пространственное распределение ОСО сезонных трендов во всех трех вариантах имеет различную структуру, в годовых трендах можно выделить некоторые сходные изменения. Области максимальных значений ОСО во всех вариантах расположены над Северным и Балтийским морями и над северо-западной частью Тихого океана, а минимальных — над полярными районами Евразии.

Таким образом, гипотеза, описанная в [2], была проверена на предмет выявления механиз-

ма взаимосвязи ТПО и ОСО. Использование разных наборов данных ТПО не выявило согласия с этой гипотезой, но показало существенные изменения содержания озона в зависимости от начальных данных ТПО.

Что касается влияния облачного фактора, то, как указывалось ранее, в данном исследовании оценки УФ радиации и УФ ресурсов в будущем проводятся без учета трендов облачности, но с учетом ее влияния на абсолютные значения *Q<sub>ery</sub>*. Это было подтверждено тем, что по выполненным нами оценкам модельные годовые тренды *Q<sub>ery</sub>* за период с 1979 по 2030 г. являются незначимыми и находятся в диапазоне  $\pm 1\%$  за декаду.

Для рассмотрения изменения УФ ресурсов за период с 1979 по 2099 г. для территории Евразии была рассчитана разность средних уровней УФ радиации за десятилетие 2089–2099 г. к значениям, наблюдающимся в среднем за период 1979–2015 г. Приведенные оценки были сделаны для наиболее распространенных на территории России 4-х типов кожи (рис. 5). Напомним, что чувствительность кожи человека к ультрафиолетовой радиации определяется степенью ее пигментации. Для того, чтобы охарактеризовать чувствительность кожи человека к образованию загара используется классификация

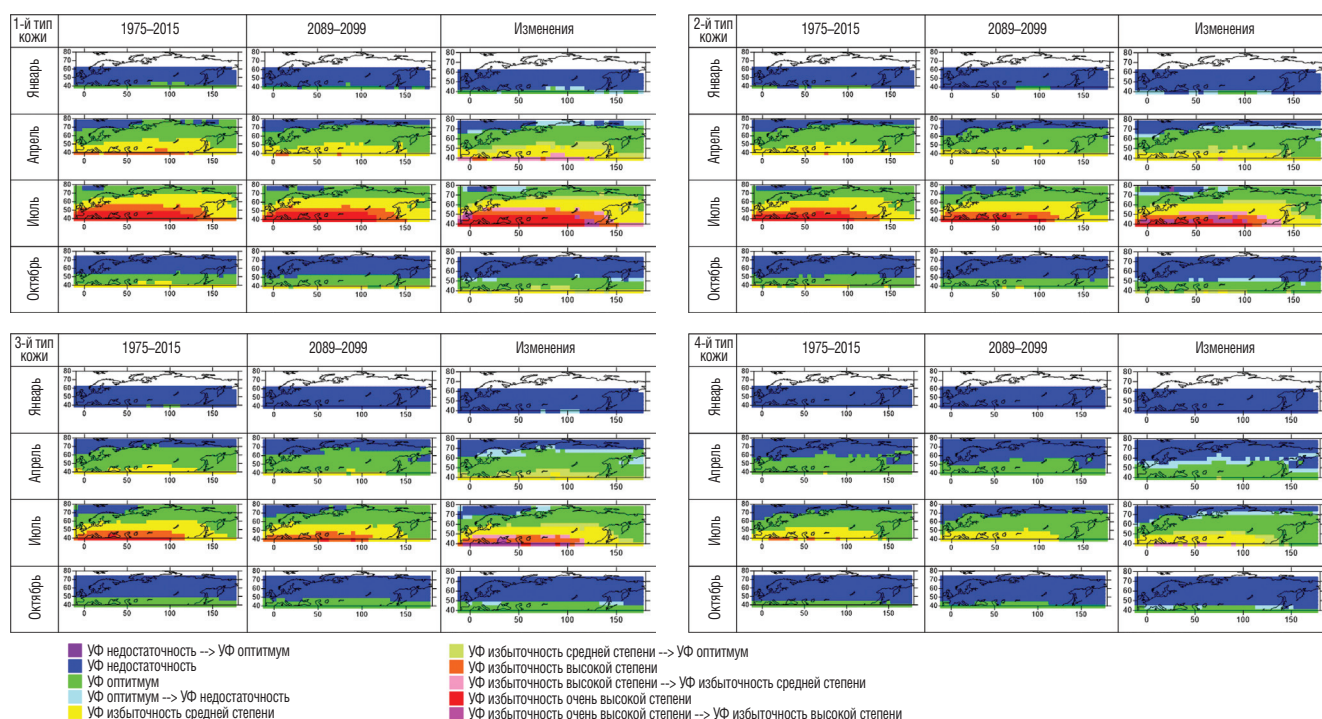


Рис. 5. Ресурсы УФ радиации и их изменения за период 2089–2099 гг. (сценарий 1.1А) относительно периода 1979–2015 гг. (сценарий 1А) для четырех типов кожи.



Фицпатрика [16], согласно которой выделяются 6 фототипов кожи. Для каждого типа кожи необходима своя минимальная доза эритемной радиации, приводящая к покраснению кожи.

Показано, что практически во все сезоны и для всех типов кожи к концу XXI в. будет наблюдаться изменение категорий УФ ресурсов на единицу градации. При этом наиболее ярко проявляется сдвиг условий УФ избыточности и УФ недостаточности к югу в апреле и июле. Для первого типа кожи также наблюдается расширение области УФ оптимума на Дальнем Востоке вследствие увеличения ОСО на 16–18% в регионе, а также наблюдается сокращение зоны распространения УФ избыточности средней степени на юге. В июле область УФ оптимума для первого типа кожи распространяется до 68° с. ш. на юге, тем самым сокращается область УФ избыточности средней степени. Вместе с тем область УФ избыточности средней степени расширяется к югу на европейской территории Евразии, заменяя категорию УФ избыточности высокой степени. Для второго типа кожи в июле границы зоне УФ избыточности средней степени смещаются на севере (до 64° с. ш.) и на юге (до 52° с. ш.). Для третьего типа кожи область УФ недостаточности в апреле распространяется на Скандинавский полуостров и располагается южнее прежней локализации на азиатской территории Евразии, в июле наблюдается смещение зоны УФ избыточности средней степени к югу. Для четвертого типа кожи в апреле характерно смещение области УФ недостаточности до 48° с. ш., а в июле полностью исчезает наблюдаемая ранее область категории УФ избыточности.

### ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Результаты численных экспериментов показали, что в настоящее время (2016–2020 гг.) наблюдаются повышенные значения  $Q_{ery}$  относительно базового уровня 1979–1983 гг., однако уже к 2035–2039 гг., при условии выбросов озоноразрушающих веществ в соответствии со сценарием WMO A1, разница с базовым периодом 1979–2015 гг. будет стремиться к нулю. Дальше, при реализации сценария WMO A1, значения  $Q_{ery}$  будут снижаться и в 2055–2059 гг. на всей территории северной Евразии будут на 4–6% меньше, чем значения базового периода.

2. Температура поверхности океана оказывает существенное влияние на концентрацию озона. Различия в отклике озона на изменения температуры поверхности океана не показали

согласия с существующей гипотезой [2]. Однако отметим, что в данный момент можно утверждать, что наблюдающиеся различия в ОСО сильно зависят от различных баз данных по ТПО и ППЛ.

3. Расчет УФ ресурсов показал, что для всех типов кожи и во все сезоны года наблюдается изменение категорий УФ ресурсов на единицу градации преимущественно на границах категорий УФ ресурсов для периода 2089–2099 гг. по сравнению с периодом 1979–2015 гг. Наибольшие изменения в пространственном распределении УФ ресурсов на территории Северной Евразии наблюдаются в апреле и июле, эти изменения проявляются в расширении областей УФ недостаточности на севере рассматриваемой территории и в сокращении областей УФ избыточности на юге.

Отметим, что полученные долгопериодные изменения УФ ресурсов связаны только с влиянием вариаций общего содержания озона. В дальнейшем планируется провести численные эксперименты и настройку модели ХКМ-РГГМУ для корректного воспроизведения долгопериодных изменений облачности, что позволит более надежно прогнозировать УФ ресурсы в будущем.

**Благодарности.** Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ 18-05-00700.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Галин В.Я., Смышляев С.П., Володин Е.М. Совместная химико-климатическая модель атмосферы // Изв. РАН Физика атмосферы и океана. 2007. Т. 43. № 4. С. 437–452.
2. Жадин Е.А. Арктическое колебание и межгодовые вариации температуры поверхности Атлантического и Тихого океанов // Метеорология и гидрология. 2001. № 8. С. 28–40.
3. Чубарова Н.Е., Пастухова А.С., Смышляев С.П., Галин В.Я. Многолетняя изменчивость УФ радиации в Московском регионе по данным измерений и моделирования // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2018. Т. 54. № 2. С. 160–167.
4. Bais A., Lubin D. et al. Surface ultraviolet radiation: past, present and future, Chapter 7 in Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2006 // Switzerland, Geneva: WMO. Global Ozone Research and Monitoring Project. Report No. 50., 2007. 572 pp.
5. Corrêa M. de Pl., Godin-Beekmann S., Haefelin M., Bekki S., Saiag P., Badosa J., Jégou F., Pazmiño A., Mahé E. Projected changes in clear-sky erythemal and vitamin D effective UV doses for Europe over

- the period 2006 to 2100 // *PhotochemPhotobiol Sci.* 2013. V. 12(6). P. 1053–1064.
6. Chubarova N., Pastukhova A., Zhdanova E., Smyshlyaev S., Galin V. Temporal variability of UV irradiance and UV resources over Northern Eurasia according to measurements and modelling. 2019. In print.
  7. Chubarova N., Zhdanova Ye. Ultraviolet resources over Northern Eurasia // *J. of Photochem. and Photob. B: Biology.* 2013. V. 127. P. 38–51.
  8. Chubarova N., Zhdanova Ye., Nezval Ye. A new parameterization of the UV irradiance altitude dependence for clear-sky conditions and its application in the on-line UV tool over Northern Eurasia // *Atmos. Chem. Phys.* 2016. V. 16. P. 11867–11881.
  9. Dee D., Uppala S., Simmons A. et al. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system // *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 2011. V. 137. P. 553–597. doi: 10.1002/qj.828
  10. den Outer P., Slaper H. et al. Reconstructing of erythemal ultraviolet radiation levels in Europe for the past 4 decades // *J. Geophys Res-Atmos.* 2010. V. 115. D10102.
  11. DeWolfe A., Wilson A. et al. Solar irradiance data products at the LASP Interactive Solar Irradiance Data Center (LISIRD) // *Am. G. Un.* 2010. GC21B-0881.
  12. van Dijk A. et al. Skin cancer risks avoided by the Montreal Protocol — worldwide modelling integrating coupled climate-chemistry models with a risk model for UV // *Photochem. & Photob. Sci.* 2013. V. 89(1), P. 234–246. doi: 10.1111/j.1751–1097.2012.01223.x.
  13. Egorova T., Rozanov E. et al. Montreal Protocol Benefits simulated with CCM SOCOL // *Atmos. Chem. Phys.* 2013. V. 13(7). P. 3811–3823.
  14. Eyring V.N., Butchart E. et al. Assessment of temperature, trace species, and ozone in chemistry-climate model simulations of the recent past // *J. Geophys. Res.* 2006. V. 111. № D22. P. 308.
  15. Eyring V., Butchart N. et al. Assessment of temperature, trace species, and ozone in chemistry-climate model simulations of the recent past // *J. Geophys. Res.* 2006. V. 111. № D22. P. 308. doi:10.1029/2006JD007327.
  16. Fitzpatrick T. The validity and practicality of sun-reactive skin types I through VI // *Arch. Dermatol.* 1988. V. 124. P. 869–871.
  17. Garfinkel C., Waugh D. Polvani L. Recent Hadley cell expansion: The role of internal atmospheric variability in reconciling modeled and observed trends // *Geophys. Res. Lett.* 2015. V. 42. P. 10824–10831, doi:10.1002/2015GL066942.
  18. Herman J. Global increase in UV irradiance during the past 30 years (1979–2008) estimated from satellite data // *J. of geophysical research.* 2010. V. 115. D04203. doi:10.1029/2009jd012219.
  19. Ialongo I., Arola A. et al. Use of satellite erythemal UV products in analysing the global UV changes // *Atmos. Chem. Phys.* 2011. V. 11. P. 9649–9658.
  20. Lamy K., Portafaix T., Josse B., Brogniez C. et al. Ultraviolet Radiation modelling using output from the Chemistry Climate Model Initiative // *Atmos. Chem. Phys. Discuss.* 2018. In review. <https://doi.org/10.5194/acp-2018-525>.
  21. Newman P.A. et al. What would have happened to the ozone layer if chlorofluorocarbons (CFCs) had not been regulated? // *Atmos. Chem. Phys.* 2009. V. 9. P. 2113–2128. <https://doi.org/10.5194/acp-9-2113-2009>.
  22. Rayner N., Parker D. et al. Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108(D14). P. 4407.
  23. Stenke A., Schraner M. et al. The SOCOL version 3.0 chemistry-climate model: description, evaluation, and implications from an advanced transport algorithm // *Geosci. Model Dev.* 2013. V. 6. P. 1407–1427. <https://doi.org/10.5194/gmd-6-1407-2013>.
  24. Tian W., Li Y. et al. The relationship between lower-stratospheric ozone at southern high latitudes and sea surface temperature in the East Asian marginal seas in austral spring // *Atmos. Chem. Phys.* 2017. V. 17. P. 6705–6722. <https://doi.org/10.5194/acp-17-6705-2017>.
  25. Thomason L., Peter T. Assessment of Stratospheric Aerosol Properties (ASAP) // SPARC REP. 4, WCRP-124, WMO Tech Doc. WMO-TD1295, 2006. 348 pp.
  26. UNEP. Environmental effects of ozone depletion and its interactions with climate change: Assessment 2010 // *J. of Photochem. and Photob. S.* 2011. P. 165–320.
  27. UNEP. Environmental effects of ozone depletion and its interactions with climate change: Assessment, 2014 // *J. of Photochem. and Photob. Sci.* 2015. P. 7–184.
  28. Wang C., Yang P., Liu X. A High-Spectral-Resolution Radiative Transfer Model for Simulating Multilayered Clouds and Aerosols in the Infrared Spectral Region // *J. Atmos. Sci.* 2015. V. 72. P. 926–942. <https://doi.org/10.1175/JAS-D14-0046.1>
  29. Watanabe S., Takemura T. et al. Anthropogenic changes in the surface all-sky UV-B radiation through 1850–2005 simulated by an Earth system model // *Atmos. Chem. Phys.* 2012. V. 12(11). P. 5249–5257.
  30. WMO. Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2010. World Meteorological Organization. Global Ozone Research and Monitoring // Switzerland, Geneva: Project–Report, 2011. № 52. 516 pp.



## The Forecast of Erythemal UV Irradiance over the Territory of Northern Eurasia According to the INM-RSHU Chemical-Climate Model

A. S. Pastukhova <sup>1\*</sup>, N. E. Chubarova <sup>1\*\*</sup>, Ye. Yu. Zhdanova <sup>1</sup>, V. Ya. Galin <sup>2\*\*\*</sup>,  
S. P. Smyshlyaev <sup>3\*\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>Moscow State University,  
Russia, 119991, Moscow, Leninskie Gory, 1

\*E-mail: p-annet@mail.ru, \*\*E-mail: natalia.chubarova@gmail.com

<sup>2</sup>Institute of Numerical Mathematics RAS,  
Russia, 11999, Moscow, Gubkina str., 8

\*\*\*E-mail: venergalin@yandex.ru

<sup>3</sup>Russian State Hydrometeorological University,  
Russia, 195196, St. Petersburg, Malookhtinsky pr., 98

\*\*\*\* E-mail: smyshl@rshu.ru

Received: 25.09.2018

Accepted: 06.02.2019

In this work, the impact of various factors on the total ozone column and erythemal UV radiation ( $Q_{ery}$ ) in the territory of Northern Eurasia for the period from 1979 to 2059 based on the calculations of the chemical-climate model INM-RSHU is analyzed. The sensitivity of ozone recovery to the setting of different input data on sea surface temperature (SST) is estimated. Depending on the SST datasets, there are significant differences in ozone trends. A possible mechanism that explains the reasons for these differences is examined. The numerical experiment with the only change in ozone depleting substances according to Montreal protocol showed the ozone recovery and, as a result,  $Q_{ery}$  reduction, but this recovery is not linear. During the 2016-2020 period we estimated the 2-5% increase in  $Q_{ery}$  values relative to the baseline period (1979-1983) with about 6% maximum over Russian polar region. During the 2035-2039 period the  $Q_{ery}$  change against 1979-1983 period is about zero, during the 2055-2059 period we obtained the decrease of about 4-6% over Northern Asia and 6-8% over Northern Europe. These changes corresponded to the noticeable boundary location shift of UV resources, which determine UV radiation impact on human health. The most significant changes will be observed in spring and summer: the UV deficiency zone will be expanded in the north and the UV excess zone over northern seas will be reduced in the south.

**Keywords:** ultraviolet radiation, ozone, cloud UV transmission, chemical-climate modelling.