

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИЗУЧЕНИЯ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОЙ РАДИАЦИИ И ОЗОНОВОГО СЛОЯ

© 2016 г. Н.Е. Чубарова^а, Е.Ю. Жданова^а, В.У. Хаттатов^б, П.Н. Варгин^б

^а Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

^б Центральная аэрологическая обсерватория Росгидромета, Долгопрудный, Россия

e-mail: chubarova@geogr.msu.ru; ekaterinazhdanova214@gmail.com;
slava_khattatov@gmail.com; p_vargin@mail.ru

Поступила в редакцию 22.09.2015 г.

В предлагаемой вниманию читателей статье рассказывается о наиболее актуальных направлениях мониторинга и исследований ультрафиолетовой радиации, влияющей на здоровье человека, состояние экосистем, а также озонового слоя. Рассказывается о проводимых за рубежом и в России наземных и спутниковых наблюдениях за озоновым слоем и УФР. Рекордная за все годы наблюдений аномалия озонового слоя в Арктике весной 2011 г., когда повышенные уровни УФР были отмечены даже в Москве, подтвердила необходимость дальнейших исследований в данной области. Рост онкологических заболеваний кожи, наблюдаемый во многих странах, в том числе и в России, а также часто встречающийся дефицит в организме человека витамина D, образующегося главным образом в коже под воздействием солнечного света, требуют расширения мониторинга УФР на территории нашей страны, особенно в южных регионах, его изучения с использованием численного моделирования.

Ключевые слова: УФ-радиация, озоновый слой, влияние УФ-радиации на здоровье человека и экосистему.

DOI: 10.7868/S0869587316050030

Несмотря на малую долю ультрафиолетовой радиации (УФР) в солнечном спектре, она оказывает значительное влияние на здоровье человека, состояние водных и наземных экосистем, биогеохимические циклы, качество воздуха [1]. Повышенные дозы УФР отрицательно влияют на кожу, глаза и иммунную систему человека. Для кожи воздействие УФР связано с риском возникновения онкологических заболеваний (меланомный и немеланомный рак, базально-клеточная карцинома и плоскоклеточный рак) [2]. Ежегодная заболеваемость злокачественной кожной меланомой варьирует географически от 5 и 24 на 100 тыс. человек в Европе и США до 70 на 100 тыс. человек в условиях высокого уровня УФР в Австралии и Новой Зеландии. Заболеваемость базально-кле-

точной карциномой в Великобритании увеличилась на 3% в 1996–2003 гг. [1]. По данным [3], в России количество больных меланомой кожи, находившихся под наблюдением в 2012 г., составило 71666 человек, с другими новообразованиями кожи – 361271 человек. За последние десятилетия рост заболеваемости меланомой отмечается на 1.6% за 10 лет.

Повышенные дозы УФР могут способствовать возникновению таких глазных заболеваний, как катаракта, птеригиум, дегенерация конъюнктивы, плоскоклеточный рак роговицы и конъюнктивы, острые фотокератиты и фотоконъюнктивиты [1]. Подавление иммунной системы под действием УФР ведёт к распространению инфекционных заболеваний, уменьшению эффективности вакцинации. Избыточные дозы УФР могут вызывать также различные виды аллергий (дерматологические реакции). Опасное действие на здоровье человека накопленных доз УФР может проявляться спустя десятилетия.

В то же время небольшие дозы УФР оказывают положительное действие: более 90% необходимо для организма человека витамина D образуется

ЧУБАРОВА Наталья Евгеньевна – доктор географических наук, профессор географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова. ЖДАНОВА Екатерина Юрьевна – аспирант географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова. ХАТТАТОВ Вячеслав Усеинович – кандидат физико-математических наук, заведующий отделом исследования состава атмосферы ЦАО. ВАРГИН Павел Николаевич – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник ЦАО.

под воздействием солнечного света [4]. Недостаток витамина D приводит к развитию рахита у детей, а также к различным видам заболеваний костей (остеопороз), повышению риска сердечных заболеваний, к ряду злокачественных опухолей (рак молочной и предстательной желёз, толстого кишечника), аутоиммунных заболеваний (диабет, рассеянный склероз, ревматоидный артрит) и таких инфекций, как туберкулёз [5].

Нехватка витамина D наблюдается у значительной части населения многих стран, например, США и Великобритании. Для территории России эта проблема также является актуальной [6]. Частично недостаток этого витамина в организме пытаются компенсировать, используя лекарственные средства или увеличивая потребление некоторых продуктов питания. Однако естественный процесс образования витамина D через облучение солнечным светом является наиболее эффективным [4]. В последние годы активно исследуется противoinфекционный эффект витамина D [7].

Учитывая существенное влияние УФР на здоровье человека и биосферу в целом, чрезвычайно важно проводить её постоянный мониторинг, а также изучать факторы, определяющие поступление УФР к поверхности Земли. Известно, что биологическое действие УФР максимально в области длин волн менее 315 нм, где её интенсивность зависит от общего содержания озона в атмосфере.

Озон формируется в стратосфере, поглощая коротковолновое солнечное излучение с длинами волн менее 250 нм, и защищает биосферу Земли от опасной ультрафиолетовой радиации. Кроме того, озон в значительной степени определяет вертикальный профиль температуры в стратосфере. В тропосфере, поглощая уходящую от Земли длинноволновую радиацию, озон участвует в создании парникового эффекта.

Сильное уменьшение озонового слоя в весенние месяцы в Антарктике в начале 1980-х годов привело к принятию в 1985 г. Венской конвенции об охране озонового слоя и подписанию в 1987 г. Монреальского протокола о сокращении производства и потребления озоноразрушающих веществ. Основная цель принятых мер заключается в предохранении биосферы (в первую очередь в предотвращении вредного воздействия УФР на здоровье человека) от повышенных доз коротковолновой УФР, возможных при истощении стратосферного озонового слоя. Международные соглашения по охране озонового слоя способствовали развитию исследований в этой области и расширению сети мониторинга УФР и озона. Такие исследования актуальны не только в силу большой неопределённости сроков восстановления озонового слоя до уровня начала 1980-х го-

дов, но и в связи с многочисленными открытыми вопросами, касающимися химических и динамических атмосферных процессов, которые влияют на состояние озонового слоя [8].

Со времени принятия мировым сообществом, включая Россию, предусмотренных Монреальским протоколом мер по поэтапному сокращению производства и потребления озоноразрушающих веществ прошло уже более 25 лет. Однако состояние озонового слоя всё ещё вызывает серьёзное беспокойство. Рекордная отрицательная аномалия озона в Арктике весной 2011 г. вызвала аномальное увеличение УФР [2].

Следует отметить, что поступление УФР к поверхности Земли зависит не только от общего содержания озона в атмосфере, но и от многих других геофизических факторов (облачность, уровень содержания аэрозолей в атмосфере, отражающие свойства поверхности и др.). Вследствие изменения климата эти параметры тоже могут изменяться, что делает климатический прогноз УФР ещё более сложным по сравнению с прогнозом озона.

Результаты исследований и мониторинга озонового слоя и УФР, проводимых учёными разных стран, в том числе в России, раз в 4 года обобщаются в специальных публикациях Всемирной метеорологической организации и в Программе ООН по окружающей среде (ЮНЕП). Последние результаты были обнаружены весной 2015 г. [2, 9].

Мониторинг озона и УФР. Первые измерения УФР были проведены в Давосе (Швейцария) в 1907 г. Активное развитие измерительной техники в 1920–1930 гг. привело к созданию спектрофотометра Добсона, который до сих пор используется на станциях озонометрической наземной сети во многих странах мира. Наиболее длинный ряд наблюдений за общим содержанием озона (ОСО) – с 1926 г. – имеется на высокогорной станции Ароза в швейцарских Альпах [10].

В Канаде в 1970-е годы А.У. Брюером и Д.И. Вардлем был разработан комбинированный спектрометр, получивший название “спектрофотометр Брюера”, который позволяет измерять ОСО и УФР в автоматическом режиме.

Большой вклад в исследование УФР внесли П. Бенер (Швейцария) [11] и группа под руководством советского физика В.А. Белинского [12]. В 1960-е годы в Метеорологической обсерватории МГУ А.В. Высоцким и М.П. Гараджой был разработан широкополосный прибор, позволяющий измерять УФР в диапазоне спектра 300–380 нм. С его помощью получен самый длинный в мире непрерывный ряд измерений УФР с 1968 г. [10, 13].

Российские станции и ряд станций на территории бывших союзных республик в основном оснащены разработанными в Главной геофизи-

ческой обсерватории им. А.И. Воейкова фильтрационными озонόμεтрами М-124, позволяющими также проводить измерения УФ-В радиации. Сейчас 14 станций Росгидромета используют корректирующие приставки к озонόμεтрам М-124 для измерения эритемно-взвешенной УФР. С 2005 г. в рамках модернизации актинометрической сети были закуплены 19 автоматических измерительных комплексов фирмы KIPP&Zonen, шесть из которых включают измерения ультрафиолетовой радиации областей А и В. Мониторинг состояния озонового слоя осуществляется на 35 станциях национальной озонόμεтрической сети, ответственность за поддержание которой возложена на Росгидромет. В Томске, Долгопрудном, Обнинске, а также на высокогорной станции Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН в Кисловодске проводятся измерения ОСО и УФР с помощью спектрофотометров Брюера. Начиная с 2009 г. в рамках специальной федеральной программы Росгидромета под руководством специалистов Центральной аэрологической обсерватории (ЦАО) создаётся сеть высокоточных измерений ОСО с помощью автоматических спектрофотометров Mini-SAOZ, которые расположены в районах, где часто отмечаются аномалии ОСО в зимне-весенний период. К настоящему времени в режиме сетевых наблюдений функционируют шесть станций, оснащённых этими приборами (Анадырь, Жиганск, Салехард, Мурманск, Иркутск, Долгопрудный). Непрерывный мониторинг биологически активной УФР осуществляется в метеорологических обсерваториях МГУ и Томска.

Данные наземных измерений озона и ультрафиолетовой радиации с 1960 г. регулярно направляются национальными метеорологическими агентствами в Международный центр Всемирной метеорологической организации архивации данных по УФР и озону, являющийся частью программы глобальных атмосферных наблюдений (Global Atmosphere Watch). Наряду с глобальным архивом, создан ряд региональных центров по мониторингу и хранению данных измерений УФР – NSF Polar UV Monitoring Network, USDA UV-B Monitoring and Research Program. Активно развивается и центр данных по УФР в Европе (EUUVDB).

Для понимания динамических и химических процессов важно знать не только величину ОСО, но и его вертикальный профиль. Мониторинг вертикального распределения озона с поверхности Земли ведётся с 1970-х годов с помощью электрохимических датчиков на озонозондах. Вертикальное разрешение с учётом времени реакции датчика составляет около 200–300 м, а максимальная высота, до которой поднимаются озонозонды, – 25–30 км. На больших высотах используются лидары (до высоты 50 км) с разрешением ~100–200 м и микроволновые радиометры

(на высотах от 20 до 70 км) с разрешением ~5–10 км. В настоящее время наблюдения за состоянием озона и УФР активно проводят, кроме того, с помощью спутниковых приборов (табл.). Алгоритмы восстановления озона разработаны и для некоторых других спутниковых приборов, данные которых доступны на сайте WMO Ozone Mapping Centre (<http://lap.physics.auth.gr/ozonemaps2/>). Важнейшим преимуществом спутниковых данных по сравнению с наземными методами измерений является их глобальное покрытие, охватывающее в том числе и занимаемую океаном большую часть поверхности Земли. Точность определения потоков УФР значительно ухудшается над поверхностями со снежным покровом и в условиях сильного загрязнения атмосферы поглощающим аэрозолем и оптически активными газами [14, 15]. Это делает актуальной валидацию спутниковых измерений УФР по наземным данным, а также развитие новых методов оценок УФР со спутников.

Результаты исследований. Анализ данных измерений в совокупности с проведением численных экспериментов позволил оценить тренды озона и УФР и причины этих изменений в различных регионах мира, а также сделать прогнозы их будущего состояния [1, 10].

В последние годы (2008–2013) спутниковые и наземные измерения свидетельствуют о том, что содержание озона относительно значений до возникновения озоновой аномалии (1964–1980) на 2% ниже для области, охватывающей почти весь земной шар (60° ю.ш.–60° с.ш.), на 3.5% ниже в Северном полушарии (35° с.ш.–60° с.ш.) и на 6% ниже в Южном полушарии (35° ю.ш.–60° ю.ш.). Снижение содержания в стратосфере озоноразрушающих веществ с 1997 г. составило примерно 15%, и глобальное содержание озона увеличилось только на ~3 ед. Д. (или 1% с 2000 г.). В то же время отмечается значительная межгодовая изменчивость ОСО – до 5% (15 ед. Д.), что затрудняет оценку степени влияния сокращения выбросов озоноразрушающих веществ на восстановление озонового слоя [9].

Важный вклад в понимание закономерностей изменения содержания озона и озоноразрушающих веществ в верхней атмосфере внесли комплексные эксперименты на самолёте-лаборатории М-55 “Геофизика”, проводимые европейскими и российскими учёными в различных регионах Северного и Южного полушарий с конца 1990-х годов. С помощью этого самолёта с 1999 г. в ходе нескольких кампаний с участием учёных Центральной аэрологической обсерватории были проведены прямые измерения в стратосфере пространственно-временных распределений концентраций озона и ряда химических веществ, способных разрушать озоновый слой или

Основные спутники с инструментами для измерения общего содержания озона (ОСО) и УФР и их характеристики (по данным <http://www.wmo-sat.info/oscar/instruments>)

| Годы | Спутник | Приборы | Характеристики |
|-------------|----------------------------|---|---|
| 1969–1972 | Nimbus-3 | BUV (Backscatter Ultraviolet Spectrometer) | Вертикальные профили озона, других газов и солнечного излучения; 12 дискретных каналов шириной 1 нм в интервале длин волн 250–340 нм. Глобальное покрытие в течение 10 дней, разрешение 170 км. |
| 1970–1980 | Nimbus-4 | BUV (Backscatter Ultraviolet Spectrometer) | |
| 1978–1993 | Nimbus-7 | SBUV/TOMS (Solar Backscatter Ultraviolet/Total Ozone mapping Spectrometer) | SBUV – вертикальные профили озона, других газов и солнечного излучения; 12 дискретных каналов шириной 1 нм в интервале длин волн 250–340 нм или непрерывная развёртка от 160 до 340 нм. Глобальное покрытие 14 дней, разрешение 200 км. TOMS – измерения общего содержания озона, 6 каналов: 312.5, 317.5, 331.3, 339.9, 360, 380 нм, ширина 1 нм. Глобальное покрытие каждый день, разрешение 50 км в подспутниковой точке. |
| 1985–н. вр. | NOAA 9, 11, 14, 16, 17, 18 | SBUV, SBUV/2 (Solar Backscattered Ultraviolet Spectrometer) | SBUV – вертикальные профили озона, других газов и солнечного излучения; 12 дискретных каналов шириной 1 нм в интервале длин волн 250–340 нм или непрерывная развёртка от 160 до 340 нм. Глобальное покрытие 14 дней, разрешение 200 км. SBUV/2 – вертикальные профили озона, других газов и солнечного излучения; 12 дискретных каналов шириной 1 нм в интервале длин волн 252–340 нм или непрерывная развёртка от 160 до 340 нм. Глобальное покрытие 10 дней, разрешение 170 км. |
| 1993–1994 | Meteor-3 | TOMS (Total Ozone mapping Spectrometer) | Общее содержание озона, 6 каналов: 312.5, 317.5, 331.3, 339.9, 360, 380 нм, ширина 1 нм. Глобальное покрытие каждый день, разрешение 50 км в подспутниковой точке. |
| 1995–2011 | ERS-2 | GOME (Global Ozone Monitoring Experiment) | Профиль и общее содержание озона, содержание газов BrO, ClONO ₂ , H ₂ O, HCHO, NO ₂ , O ₂ , O ₃ , O ₄ , OClO, SO ₂ , содержание аэрозолей; 4 полосы, 4096 каналов, 3 поляризационных канала. UV-NIR: 240–790 нм (разрешение 0.2–0.4 нм). Глобальное покрытие каждые 24 дня с высоким разрешением, каждые 3 дня – с низким разрешением. |
| 1996–2000 | Earth Probe | TOMS (Total Ozone mapping Spectrometer) | Общее содержание озона, 6 каналов: 312.5, 317.5, 331.3, 339.9, 360, 380 нм, ширина 1 нм. Глобальное покрытие каждый день, разрешение 50 км в подспутниковой точке. |
| 2002–2012 | ENVISAT | SCIAMACHY (Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Cartography) | Различные малые газовые примеси – BrO, CH ₄ , ClO, CO, CO ₂ , H ₂ O, HCHO, N ₂ O, NO, NO ₂ , NO ₃ , O ₂ , O ₃ , O ₄ , OClO, SO ₂ , аэрозоли. UV/VIS/NIR/SWIR, 8 полос, 8192 каналов, 7 поляризационных каналов, 214–2380 нм. Надирные и лимбовые измерения. Глобальное покрытие каждые 3 дня. |
| 2004–н. вр. | Aura | OMI (Ozone Monitoring Instrument) | Профиль и общее содержание озона, содержание газов BrO, NO ₂ , O ₃ , OClO, SO ₂ , аэрозоли. UV/VIS 3 полосы, 1560 каналов, 270–500 нм. Глобальное покрытие каждый день. |
| 2006–н. вр. | MetOp-A | GOME-2 (Global Ozone Monitoring Experiment) | Профиль и общее содержание озона, содержание газов BrO, ClONO ₂ , H ₂ O, HCHO, NO ₂ , O ₂ , O ₃ , O ₄ , OClO, SO ₂ , содержание аэрозолей; 4 полосы, 4096 каналов, 3 поляризационных канала. UV-NIR: 240–790 нм (разрешение 0.2–0.4 нм). Глобальное покрытие каждые 24 дня с высоким разрешением, каждые 3 дня – с низким разрешением. |
| 2011–н. вр. | SNPP | OMPS (Ozone Mapping and Profiler Suite) | Лимбовые измерения – атмосферная химия – стратосферные профили BrO, H ₂ O, HCHO, NO ₂ , NO ₃ , O ₃ , OClO, SO ₂ . UV/VIS/NIR: 290–1000 нм; спектральное разрешение 0.75–25 нм, горизонтальное разрешение 300 км, вертикальное 2.2 км. Глобальное покрытие каждые 4 дня. Надирные измерения: профиль и общее содержание озона, общее содержание BrO, HCHO, NO ₂ , O ₃ , SO ₂ . |

участвующих в формировании его фотохимического баланса в верхней атмосфере (водяной пар, окислы азота, хлорфторуглеродные компоненты антропогенного происхождения, суммарное содержание хлора и брома в нижней стратосфере), а также термодинамических характеристик нижней стратосферы (температурно-ветровой режим и пульсации полей температуры и ветра).

Измерения параметров атмосферы проводились в разные сезоны года, над различными регионами земного шара, в том числе и в период образования озонной аномалии над Антарктидой и в высоких широтах Арктики. Самолёт-лаборатория обеспечил непрерывные продолжительные измерения эволюции химического состава и строения атмосферы в заданных районах и на определённых высотах, представляющих интерес с точки зрения оценки состояния озонового слоя в нижней стратосфере и изучения механизмов его изменений [16]. Основной научной целью самолётных экспедиций являлось исследование динамики формирования антарктического полярного вихря, оценка состояния озонового слоя над Антарктидой и Арктикой в весенний период во время наибольшего разрушения озонового слоя. Изучались движения воздушных масс, процессы, связанные с влиянием стратосферного полярного вихря и воздействие антропогенных химических веществ на состояние стратосферного озона в полярных районах. Впервые на основе прямых самолётных измерений была получена оценка влияния гравитационных волн на температурный режим в нижней стратосфере. Высокоточные измерения концентраций озона и озоноразрушающих веществ в нижней стратосфере подтвердили, что при определённых метеорологических условиях над Антарктидой и Арктикой наблюдается полное химическое разрушение озона в нижней стратосфере в весенние месяцы. Уникальные характеристики высотной лаборатории, созданной на базе российского самолёта М-55, прежде всего возможность летать на дозвуковых скоростях на любых высотных эшелонах в верхней тропосфере и стратосфере вплоть до высоты ~21 км, позволяют осуществлять мониторинг антропогенных изменений состояния озонового слоя.

Анализ расчётов лучших в мире химико-климатических моделей показывает, что уменьшение концентраций озоноразрушающих соединений, а также снижение температуры стратосферы и возможное усиление меридиональной циркуляции Брюера–Добсона из-за увеличения содержания парниковых газов будут влиять на восстановление озонового слоя, причём влияние этих факторов в разных широтных поясах будет различным. В целом восстановление среднеглобального среднегодового общего содержания озона до значений 1980-х годов ожидается к середине текущего века, но оно сильно варьирует в зависимости от

географического региона. Оценки, сделанные по химико-климатической модели ИВМ–РГМУ [17], выявили существенную роль температуры стратосферы в восстановлении озонового слоя.

Так как именно динамические процессы определяют степень химического разрушения озона в полярной стратосфере весной, большое значение имеет исследование этих процессов, в частности, возникновения внезапных стратосферных потеплений (ВСП), в результате которых температура может увеличиться за 2–3 дня на 50–60°, а полярный вихрь сместиться от полюса или разделиться на две части. Показано, что волновые цепочки в тропосфере, перемещающиеся в восточном направлении, способны внести вклад в усиление распространения волновой активности из тропосферы в стратосферу, которое предшествует возникновению ВСП [18–20].

Начиная с 2000 г. в ЦАО совместно с учёными стран ЕС осуществляется мониторинг состояния озонового слоя в Арктике в зимне-весенний сезон, когда внутри стратосферного полярного вихря происходит химическое разрушение озона в результате гетерогенных химических реакций на частицах полярных стратосферных облаков (PCO). Для оценок химических потерь озона используются данные спутникового прибора MLS-AURA, баллонные измерения озона на станциях международной сети наблюдений за составом атмосферы (NDACC), а также радиационная модель для расчёта скорости неадиабатического опускания воздушных масс в полярном вихре. С помощью методики расчёта химических потерь озона [21] показано, что для Арктики характерна большая межгодовая изменчивость степени химического разрушения озона, обусловленная сильной изменчивостью динамических характеристик стратосферного полярного вихря — его силы, стабильности, длительности, а также температурного режима. Наибольшие потери общего содержания озона за счёт процессов его химического разрушения наблюдались в зимние сезоны без ВСП со стабильным, долгоживущим и холодным полярным вихрем. Например, в 2000 г. потери ОСО составляли 93 ± 13 ед. Д., в 2005 г. — 116 ± 10 ед. Д, а в 2011 г. — 150 ± 13 ед. Д. (рекордное значение, когда в Арктике впервые наблюдались условия для химического разрушения озона, сравнимые с антарктическими). В тёплые зимние сезоны с нестабильным короткоживущим вихрем из-за возникновения ВСП (например, в 2013 г.) химические потери ОСО составляли лишь 19 ± 10 ед. Д.

С использованием спутниковых данных и регрессионных моделей в ЦАО в течение последних 20 лет проводятся исследования изменений общего содержания озона, а также вклада в эту изменчивость различных крупномасштабных дина-

мических процессов. В частности, установлены связи ОСО и арктического колебания (АК). Показано, что в 1979–1994 гг. повышением зимне-весеннего индекса АК можно объяснить до 40% наблюдаемого уменьшения ОСО в умеренных широтах Северного полушария [22].

С помощью данных ОСО и ERA-Interim с 1979 по 2014 г. оценён вклад в изменчивость общего содержания озона арктического и антарктического колебаний, квазидвухлетних колебаний зонального ветра в экваториальной стратосфере, Эль-Ниньо (южное колебание), солнечной активности, содержания в стратосфере озоноразрушающих соединений и вулканических аэрозольных частиц. Изменения глобального ОСО могут быть аппроксимированы регрессионной зависимостью от содержания озоноразрушающих соединений и солнечной активности. В отдельных широтных зонах для описания временного хода ОСО следует дополнительно учитывать и другие факторы [23].

Картина временной и пространственной изменчивости УФР довольно сложна в силу воздействия на неё вариаций не только озона, но и других геофизических факторов – облачности, аэрозоля, альbedo поверхности. Следует отметить, что во многих регионах в последние годы отмечается заметный рост УФР. На основании данных многолетних измерений и модельных расчётов для Московского региона выявлен существенный положительный тренд эритемной УФР, который составляет примерно 6% за декаду с начала 1980-х годов. Использование модели реконструкции УФР выявило существенное влияние на этот рост не только сокращения озона, но и снижения потерь УФР из-за облачности, а также уменьшения аэрозольного содержания в атмосфере в последние десятилетия над европейской территорией России [24]. Аналогичные тенденции прослеживаются европейскими исследователями [25, 26] в других регионах, главным образом за счёт тенденции к уменьшению ОСО с 1980-х годов и уменьшению облачности с 1990-х годов [10].

По данным спутниковых измерений, рост УФР в 1979–2008 гг. составил порядка 2–4% за десятилетие и наиболее ярко проявился в средних широтах Северного полушария, главным образом из-за дополнительного влияния пониженной облачности [27]. Климатический прогноз эритемной УФР показывает, что её среднегодовые значения вернутся к значениям 1980-х годов в первой четверти XXI в. в средних и высоких широтах Северного полушария и на 20–30 лет позже в тех же широтах Южного полушария [1, 2].

В работе [28] представлены эксперименты с химико-климатической моделью SOKOL с целью прогноза ОСО и эритемной УФР в XXI в. с различными сценариями изменения концентраций

озоноразрушающих веществ. Применение сценария с ростом эмиссий озоноразрушающих веществ на 3% в год выявило, что в течение 1970–2100 гг. может наблюдаться рост эритемной УФР в 4–16 раз. Для сценария, в котором эмиссия была задана согласно Монреальскому протоколу и его поправкам, обнаружено, что уменьшение УФР должно было начаться с 2000 г. с последующим уменьшением на 5–10% в средних широтах Северного и Южного полушарий [28].

Большое внимание уделяется исследованию различных факторов, влияющих на ультрафиолетовую радиацию. Как отмечалось ранее, наибольший вклад в изменение УФР оказывают облачность и общее содержание озона. При этом влияние озона на тренды эритемной УФР проявляется сильнее в Южном полушарии [27]. В то же время в Северном полушарии, особенно в промышленных районах, заметную роль в ослаблении УФР играют аэрозоль и оптически активные газы. Ослабление эритемной радиации в условиях адвекции дымового аэрозоля при больших оптических толщинах аэрозоля может превышать 90% [29]. Загрязнение атмосферы способно привести к существенному снижению (до 40%) эритемной УФР в Японии по сравнению с чистым районом Новой Зеландии [30].

Сейчас разрабатываются новые методы оценки УФР, характеризующие её комплексное влияние на здоровье человека. В частности, предлагается ввести понятие “УФ-ресурсы”, с помощью которого можно одновременно оценивать положительное и отрицательное воздействие УФР на разные типы кожи в различных условиях [6]. В данной работе оценка УФ-ресурсов была проведена на основе радиационной модели атмосферы, использующей точные методы расчёта радиационного переноса для территории Северной Евразии с пространственным разрешением 1° для условий ясного неба и при средних условиях облачности. Получено распределение УФ-ресурсов (областей УФ-дефицита, УФ-оптимума и УФ-избыточности разной степени опасности). Учитывалось действие УФР на кожу (эритема, образование витамина D). Разработаны алгоритмы оценки опасных доз УФР, действующей на зрение, на основании которых было показано, что ареалы опасных доз этого типа биологически активной УФР наблюдаются в основном в северных и восточных районах России в весенние месяцы. При этом происходит существенное (до 50%) сужение области УФ-оптимума.

Известно, что с увеличением высоты над уровнем моря существенно меняется атмосферное давление, а также содержание озона, аэрозоля и альbedo поверхности. Поэтому в горах уровень УФР значительно выше, чем на уровне моря [10]. Для оценки УФР в высокогорье разработана па-

раметризация для разных типов биологически активной УФР от высоты над уровнем моря с учётом изменения упомянутых факторов.

В МГУ им. М.В. Ломоносова развиваются интерактивные программы, позволяющие в режиме онлайн оценивать УФ-ресурсы в разных регионах Северной Евразии для различных типов кожи, разных временных и пространственных координат, условий облачности, аэрозоля, альbedo поверхности, озона [31]. Существуют также интерактивные программы для оценки влияния УФР на здоровье человека, использующие иные подходы (например, http://nadir.nilu.no/~olaeng/fas-trt/README_VitD_quartMEDandMED_v2.html). В ЦАО совместно с Метеорологической обсерваторией МГУ проводятся работы по созданию сайта с целью предоставления прямого доступа потребителей к данным измерений озона и УФР в различных регионах России.

Важно совершенствовать краткосрочный прогноз УФР, который осуществляется в странах Европы, Америки и Австралии [10]. В настоящее время экспериментальный прогноз УФ-индекса делается и в Гидрометцентре России. Знание уровня опасности УФР особенно важно в связи со значительным перемещением населения в период отпусков в южные регионы страны, а также на зарубежные курорты. Известно, что для самих жителей южных регионов, кожа которых в результате многолетней адаптации содержит больше меланина, риск негативных последствий высокого уровня УФР значительно ниже, чем для приезжих из северных регионов [6]. Большие дозы ультрафиолетовой радиации, получаемые отдыхающими, могут быть опасными для здоровья и со временем вызывать онкологические заболевания.

Направления актуальных исследований озона и УФР. Учитывая значительное влияние УФР на биосферу в целом и на здоровье человека в частности, представляется важным:

- расширить взаимодействие между специалистами Росгидромета, Министерства образования и науки РФ и Российской академии наук в области мониторинга и исследования озонового слоя и УФР, привлечь специалистов в области биомедицины, здравоохранения и биологии для развития исследований влияния УФР на здоровье человека и состояние экосистем с учётом отечественных и зарубежных данных мониторинга УФР и озонового слоя;

- развивать сети станций мониторинга состояния УФР и озонового слоя; планируемая сеть станций mini-SAOZ к 2020 г. будет более плотно и равномерно покрывать область высоких и средних широт территории России; мониторинг озона и УФР должен сопровождаться развитием соответствующих исследований, проведением регу-

лярной валидации используемых измерительных приборов;

- создавать российские космические системы дистанционного мониторинга озона и УФР и проводить их валидацию по данным наземных измерений;

- развивать методы краткосрочного прогноза озона, УФР и УФ-ресурсов;

- разрабатывать химико-климатические модели для оценки изменений УФР в условиях будущего климата в зависимости от сценариев развития мирового хозяйства;

- через СМИ, информационные материалы в медицинских и образовательных учреждениях (поликлиниках, больницах, школах, институтах и университетах), туристических компаниях и в регионах массового летнего отдыха повышать информированность населения о возможном негативном воздействии УФР на здоровье человека.

Всё это во многом позволит снизить нежелательные последствия и эффективно использовать благоприятное воздействие УФ-облучения на здоровье населения нашей страны.

ЛИТЕРАТУРА

1. UNEP. Environmental effects of ozone depletion and its interactions with climate change Assessment, 2010 // Journal of Photochemistry and Photobiology Sciences. 2011. № 10. P. 165–320.
2. UNEP. Environmental effects of ozone depletion and its interactions with climate change Assessment, 2014 // Journal of Photochemistry and Photobiology Sciences. 2015. № 14. P. 7–184.
3. Давыдов М.И., Аксель Е.М. Статистика злокачественных новообразований в России и странах СНГ в 2012 г. М.: Издательская группа РОНЦ, 2014.
4. Holick M. Sunlight and vitamin D for bone health and prevention of autoimmune diseases, cancers, and cardiovascular disease // The American Journal of Clinical Nutrition. 2004. V. 80. P. 1678S–88S.
5. Шварц Г.Я. Витамин D и D-гормон. М.: Анахарсис, 2005.
6. Chubarova N., Zhdanova Ye. Ultraviolet resources over Northern Eurasia // Photochemistry and Photobiology. 2013. V. 127. P. 38–51.
7. Громова О.А., Торшин И.Ю., Учайкин В.Ф. и др. Роль витамина D в поддержании противотуберкулёзного, противовирусного и общего противои инфекционного иммунитета // Инфекционные болезни. 2014. Т. 12. С. 65–74.
8. Варгин П.Н., Груздев А.Н. Что происходит с озоновым слоем в настоящее время? // Вестник РАН. 2013. № 4. С. 354–358.
9. Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2014. Report № 55 // World Meteorological Organization, Global Ozone Research and Monitoring Project. Geneva, Switzerland. 2015.

10. Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2006. Report № 50 // World Meteorological Organization, Global Ozone Research and Monitoring Project. Geneva, Switzerland. 2007.
11. *Vener P.* The diurnal and annual variations of the spectral intensity of UV sky and global radiation on cloudless days at Davos. Davos, 1963.
12. *Белинский В.А., Гараджа М.П., Меженная Л.М., Незваль Е.И.* Ультрафиолетовая радиация Солнца и неба / Под ред. В.А. Белинского. М.: Изд-во МГУ, 1968.
13. *Chubarova N., Nezval Y.* Thirty year variability of UV irradiance in Moscow // Journal of Geophysical Research. 2000. V. 105. P. 12529–12539.
14. *Krotkov N.A., Bhartia P.K., Herman J.R. et al.* Satellite estimation of spectral surface UV irradiance in the presence of tropospheric aerosols 1. Cloud-free case // Journal of Geophysical Research. 1998. V. 103. № D8. P. 8779–8793.
15. *Chubarova N., Nezval Y.I., Verdebout J. et al.* Long-term UV irradiance changes over Moscow and comparisons with UV estimates from TOMS and METEOSAT // Ultraviolet Ground- and Space-based Measurements, Models, and Effects. SPIE. 2005. P. 63–73.
16. *Borrman S., Thomas A., Rudakov V. et al.* Stratospheric aerosol measurements in the Arctic winter of 1996/1997 with the M-55 Geophysica high altitude research aircraft // Tellus B. 2000. V. 52. № 4. P. 1088–1103.
17. *Смышляев С.П., Галин В.Я., Зименко П.А. и др.* Прогностические оценки изменения содержания атмосферного озона в первой половине XXI века // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2006. № 2. С. 191–204.
18. *Варгин П.Н., Медведева И.В.* Исследование температурного и динамического режима внетропической атмосферы Северного полушария в период внезапного стратосферного потепления зимой 2012–2013 гг. // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2015. № 1. С. 20–38.
19. *Vargin P.* Stratospheric polar vortex splitting in December 2009 // Atmosphere–Ocean. 2015. № 1. P. 29–41.
20. *Peters D., Vargin P., Gabriel A. et al.* Tropospheric forcing of the boreal polar vortex splitting in January 2003 // Annales Geophysicae. 2010. № 28. P. 1–16.
21. *Цветкова Н.Д., Юшков В.А., Лукьянов А.Н. и др.* Рекордное химическое разрушение озона в Арктике зимой 2004/2005 года // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2007. № 5. С. 643–650.
22. *Звягинцев А.М., Крученицкий А.М.* О связях общего содержания озона в северном полушарии с атмосферными колебаниями // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2003. № 4. С. 505–509.
23. *Звягинцев А.М., Варгин П.Н., Пешин С.* Изменчивость и тренды общего содержания озона в 1979–2014 гг. // Оптика атмосферы и океана. 2015. № 9. С. 800–809.
24. *Chubarova N.* UV variability in Moscow according to long-term UV measurements and reconstruction model // Atmospheric Chemistry and Physics Discussions. 2008. № 8. P. 3025–3031.
25. *den Outer P.N., Slaper H., Tax R.B.* UV radiation in the Netherlands: Assessing long-term variability and trends in relation to ozone and clouds // Journal of Geophysical Research. 2005. V. 110 (D2). D02203.
26. *Krzy'scin J., Sobolewski P., Jaroslowski J. et al.* Erythmal UV observations at Belsk, Poland, in the period 1976–2008: Data homogenization, climatology, and trends // Acta Geophysica. 2010. № 1. P. 155–182.
27. *Herman J.R.* Global increase in UV irradiance during the past 30 years (1979–2008) estimated from satellite data // Journal of Geophysical Research. 2010. V. 115. D04203.
28. *Egorova T., Rozanov E., Groebner J. et al.* Montreal protocol benefits simulated with CCM SOCOL // Atmospheric Chemistry and Physics Discussions. 2013. № 7. P. 3811–3823.
29. *Chubarova N., Nezval, Y., Sviridenkov M. et al.* Smoke aerosol and its radiative effects during extreme fire event over Central Russia in summer 2010 // Atmospheric Measurement Techniques. 2012. № 3. P. 557–568.
30. *McKenzie R.L., Weinreis C., Johnston P.V. et al.* Effects of urban pollution on UV spectral irradiances // Atmospheric Chemistry and Physics Discussions. 2008. V. 8. P. 7149–7188.
31. *Жданова Е., Чубарова Н.* Интерактивная интернет-программа для определения УФ-ресурсов и расчёта доз эритемной УФ-радиации на территории Северной Евразии // Геофизические процессы и биосфера. 2015. № 2. С. 81–94.