

УЛЬТРАФИОЛЕТОВАЯ ОБЛУЧЕННОСТЬ, УФ-ИНДЕКС И ИХ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ

*М.И. Нахаев¹, Л.Б. Ананьев¹, Н.С. Иванова², А.М. Звягинцев²,
И.Н. Кузнецова¹, И.Ю. Шалыгина¹*

¹Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации

²Центральная аэрологическая обсерватория, г. Долгопрудный
murat@mecom.ru, azvyagintsev@cao-rhms.ru, muza@mecom.ru

Введение

Область ультрафиолетового (УФ) излучения включает диапазон длин волн 100–400 нм и условно делится на три группы: УФ–А (UVA) (315–400 нм), УФ–В (UVB) (280–315 нм), УФ–С (UVC) (100–280 нм). Все излучение Солнца в UVC области и приблизительно 90 % излучения в UVB области при прохождении сквозь атмосферу поглощается озоном, парами воды, кислородом и углекислым газом. Меньше всего подвергается воздействию атмосферы UVA излучение. Таким образом, ультрафиолетовое излучение, достигающее земной поверхности, в основном состоит из UVA и небольшой части UVB излучения.

Увеличение интенсивности естественной УФ радиации (УФР) может иметь негативные последствия для человека и биосферы [17]. У человека и животных оно может вызывать воспаление кожи и глаз, снижение прозрачности глазных сред, нарушение иммунитета, образование опухолей кожи. Кратковременное воздействие УФ–В излучения в относительно малых дозах вызывает лишь локальный эффект в облученном участке. При длительных воздействиях с достаточно большой накопленной дозой УФР страдает иммунная система организма в целом.

Основной результат острого действия УФР на кожу – эритемная реакция. Эритема фактически представляет собой воспалительный процесс с нарушением проницаемости сосудов и развитием покраснения. О положительной корреляции между ростом УФ излучения и увеличением случаев образования катаракты свидетельствуют экспериментальные [15] и эпидемиологические [14] данные. К важнейшим последствиям возможного увеличения УФ–В радиации можно отнести рост заболеваемости раком кожи. Ежегодно в мире диагностируются 2–3 миллиона случаев заболевания доброкачественными опухолями кожи и 132000 случаев заболевания злокачественной меланомой кожи [20].

Принципиальное отличие во взаимодействиях УФ излучения с глазом и кожей состоит в том, что в последнем случае реализуется, пожалуй, единственный положительный эффект УФР – синтез витамина D₃. При этом недостаток УФР может приводить к нарушению процесса обмена фосфора и кальция у разных групп населения, особенно у детей.

Увеличение УФР индуцирует изменения в скорости протекания ряда фотохимических реакций. Последствия этих изменений проявляются в ухудшении качества тропосферного воздуха, в увеличении частоты фотохимических смогов в урбанизированных районах и в росте содержания приземного озона в сельской местности. Являясь сильным окислителем, приземный озон не только влияет на здоровье людей, но также снижает урожай и ускоряет окисление уличных конструкционных материалов.

Исследования солнечной УФР ведутся в рамках программы GAW (Global Atmospheric Watch), ряда европейских программ (COST-713 и COST-726, EDUCE и др.), национальных американских программ USDA, EPA/NOAA и NSF (<http://fosimail.biospherical.com/nsf/>). В Канаде функционирует международный центр данных по озону и УФ радиации (WOUDC) (<http://www.msc-smc.ec.gc.ca/woudc/>), в Финляндии – европейский центр данных по ультрафиолетовой радиации (EUVDB) (<http://uv.fmi.fi/uvdb/>).

Описание множества сложных и тонких эффектов УФР можно найти в работах [8, 9, 10], которые представляют многолетние экспериментальные и теоретические исследования научной школы географического факультета МГУ, созданной еще в 1950–1970-х гг. Широко известны монография «Ультрафиолетовая радиация Солнца и неба» под редакцией В.А. Белинского [2] и Атлас карт ультрафиолетовой радиации [3].

УФ-индекс: определение, градации, наблюдения

Для количественной оценки воздействия УФР на человека используется международный стандарт – УФ-индекс (УФИ, UV index, UVI), разработанный Всемирной организацией здравоохранения при содействии Программы Организации Объединенных Наций об окружающей среде, Всемирной Метеорологической Организации, Международной Комиссии по защите от неионизирующего излучения, Немецкого Федерального Офиса защиты от радиации. Он характеризует уровень солнечного ультрафиолетового излучения у поверхности Земли и предназначен для указания на потенциально возможные неблагоприятные последствия влияния УФ излучения на здоровье людей с целью их стимулирования для своей защиты.

УФИ принимает значения от нуля и выше; чем больше значение УФИ, тем больше потенциальная опасность для кожи и глаз человека и тем меньше время, требуемое для причинения вреда здоровью. Условно диапазон изменчивости УФИ делится на пять категорий: низкий (2 и меньше), средний (3–5), высокий (6–7), очень высокий (8–10) и экстремальный (11 и больше). С ростом высоты поверхности над уровнем моря интенсивность солнечного УФ излучения увеличивается; на каждые 1000 м роста высоты приходится около 7–12 % роста УФР, что соответствует примерно единице УФИ [5, 13].

Начиная с УФИ, равном 5,5–6,0, УФ-облученность может оказать негативное воздействие на здоровье человека. Защитные средства от Солнца необходимо использовать при УФИ, равном или превышающем 3.

Наблюдательная озонметрическая сеть России

На территории бывшего СССР озонметрическая сеть состояла из 45 станций. В настоящее время на территории России 29 станций, из них действует 27. На 14 станциях Росгидромета используются корректирующие приставки к озонметрам М-124 для измерения эритемно-взвешенной УФР, то есть УФ радиации, проинтегрированной по спектру с весовыми коэффициентами, характеризующими воздействие излучения на определенный тип кожи человека. Озонметрическая сеть Росгидромета является частью озонметрической сети ГСА ВМО и действует в соответствии с ее требованиями. Национальным центром ВМО по калибровке фильтровых озонметров является ГГО (НИЦ ДЗА). Озонметры на всех станциях Росгидромета калибруются каждые 2 года. Оперативные данные Росгидромета об ОСО ежедневно собираются в ЦАО, передаются в WOUDC и отражаются на карте (<http://woudc.org>), впоследствии они могут быть скорректированы специалистами ГГО. Национальный отчет России о проведенных исследованиях по озону и УФ–В радиации за последние три года регулярно передается в Секретариат Монреальского протокола и Венской конвенции (http://www.wmo.int/pages/prog/arep/gaw/ozone_reports.html).

Исторически сложилось, что большая часть озонметрических станций находится в умеренных и высоких широтах; регулярные измерения УФР южнее 50° с.ш. на сети Росгидромета проводятся лишь на двух станциях: Владивосток и Южно-Сахалинск.

О связи УФИ с ОСО

Падающая на земную поверхность солнечная УФР радиация имеет годовую цикличность и зависит от высоты Солнца над горизонтом, содержания озона в столбе

атмосферы (ОСО), альbedo подстилающей поверхности и аэрозолей [19], влагосодержания, облачности. С точки зрения увеличения УФ-облученности уменьшение ОСО в атмосфере и процессы, способствующие образованию дефицита ОСО, являются предметом особого внимания.

В [1] показано, что в условиях отсутствия облачности в умеренных широтах высокая облученность (УФИ=8) может наблюдаться уже в начале апреля на широте 45° с.ш. при ОСО ≤ 270 е.Д., а на широте 60° с.ш. – при ОСО ≤ 200 е.Д. В период летнего солнцестояния на широте 45° с.ш. УФИ превышает 8 единиц уже при ОСО ≤ 320 е.Д., на широте Москвы – при ОСО ≤ 300 е.Д.

Анализ данных сетевых наблюдений за ОСО и ультрафиолетовой радиацией показал, что высокие значения УФИ (не меньше 6) наблюдаются в достаточно широком диапазоне ОСО, например в Красноярске при ОСО до 320 е.Д., в Иркутске – до 355 е.Д. (рис. 1).

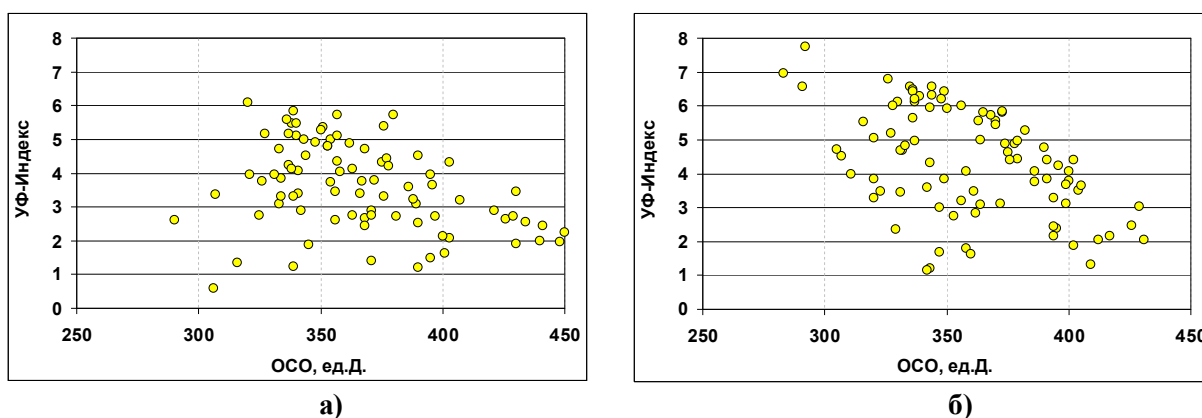


Рис. 1. ОСО и УФИ по измерениям в Красноярске (а) и Иркутске (б).

Май – август 2010 г.

Результаты проведенных нами расчетов отражают известную закономерность: с уменьшением широты увеличивается риск УФ-облученности [1], и важно иметь представление об уровне ОСО, ниже которого содержание озона становится опасным. Расчеты показали, что на пике сезонного притока УФР (июнь–июль) в умеренных широтах (50–55° с.ш.) «очень высокая» УФ-облученность (УФИ=8) в отсутствии облаков может наблюдаться при значениях ОСО меньше 300 е.Д., а в низких широтах, около 45° с.ш., это возможно при ОСО до 320 е.Д.

Учитывая многочисленные ссылки [11, 16, 18] на то, что колебания озона в столбе атмосферы сопровождаются изменениями тропопаузы, указывающей на нижнюю границу озоносферы [4, 6], проведен анализ связи ОСО с давлением на уровне тропопаузы и

температурой тропопазузы. Для анализа использованы данные радиозондирования атмосферы и спутниковые измерения ОСО (<ftp://toms.gsfc.nasa.gov/pub/omi/data/ozone>) на территории России в период 2007–2011 гг.

В табл. 1 приведены рассчитанные коэффициенты корреляции ОСО и параметров тропопазузы для трех пунктов, находящихся в разных физико-географических регионах. Заметим, что в среднем за год коэффициент корреляции ОСО с давлением на уровне тропопазузы ($R_{тр}$) составил в Петропавловске-Камчатском и Владивостоке $R=0,6-0,7$, в Москве $R=0,5$. Связь ОСО с температурой тропопазузы ($T_{тр}$) оказалась в среднем за год статистически не значима.

Установлены сезонные особенности связи ОСО и характеристик тропопазузы. Как видно в таблице, во всех пунктах связь ОСО с давлением на уровне тропопазузы теснее, чем с температурой тропопазузы.

Таблица

Коэффициенты корреляции ОСО и характеристик тропопазузы: давления ($R_{тр}$) и температуры ($T_{тр}$) в 2007–2010 гг. (для каждого месяца $N \geq 85$)

Месяц	Москва		Владивосток		Петропавловск-Камчатский	
	$R_{тр}$	$T_{тр}$	$R_{тр}$	$T_{тр}$	$R_{тр}$	$T_{тр}$
Январь	0,34	0,29	0,20	0,07	0,40	0,14
Февраль	0,23	0,20	0,57	0,52	0,48	0,17
Март	0,73	0,59	0,75	0,73	0,75	0,57
Апрель	0,62	0,61	0,72	0,52	0,57	0,50
Май	0,76	0,59	0,67	0,45	0,58	0,49
Июнь	0,60	0,46	0,65	0,45	0,41	0,38
Июль	0,51	0,38	0,46	0,43	0,61	0,50
Август	0,60	0,43	0,57	0,64	0,60	0,50
Сентябрь	0,64	0,63	0,64	0,51	0,40	0,22
Октябрь	0,58	0,44	0,24	0,14	0,47	0,28
Ноябрь	0,44	0,27	0,54	0,28	0,55	0,27
Декабрь	0,40	0,41	0,57	0,42	0,41	0,03

Наиболее тесные связи между характеристиками тропопазузы и ОСО отмечаются весной; для этого сезона характерны резкие колебания ОСО и сопутствующие резкие изменения параметров тропопазузы. Значительные колебания в период годового максимума ОСО обусловлены частой сменой глубоких высотных циклонов с высоким содержанием ОСО и теплых антициклонов с пониженным ОСО. Выявленные высокие коэффициенты корреляции ОСО с характеристиками тропопазузы в весенние месяцы во всех

рассматриваемых пунктах указывают на то, что, опираясь на устойчивость связей между ними, можно статистическими методами уточнять прогностические величины ОСО.

Летом стратосфера термически становится малоградиентной, ОСО уменьшается, как и величины его межсуточной изменчивости. Объяснением слабой связи ОСО и характеристик тропопаузы в осенне-зимний период может служить то, что в это время в годовом ходе отмечается минимум и незначительные пространственные градиенты ОСО. Кроме того, тропопауза становится размытой, определение ее точного расположения сопровождается большими погрешностями.

О связи УФИ с облачностью

При общей закономерности уменьшения проходящей УФР с увеличением облачности имеет место многообразие уточняющих факторов, делающей эту закономерность нелинейной. К числу таких факторов относятся вид и тип облаков, вертикальная структура облачности, т.е. наличие облаков разных ярусов. Обнаруживаются некоторые отличия связей УФИ с облачностью в воздушных массах различного происхождения – континентальной или морской, пришедшей из тропических широт или субарктического происхождения и т.д. На рис. 2 приводится иллюстрация связи УФИ и балла общей облачности, определенного на сети Росгидромета, во Владивостоке и Петропавловске-Камчатском.

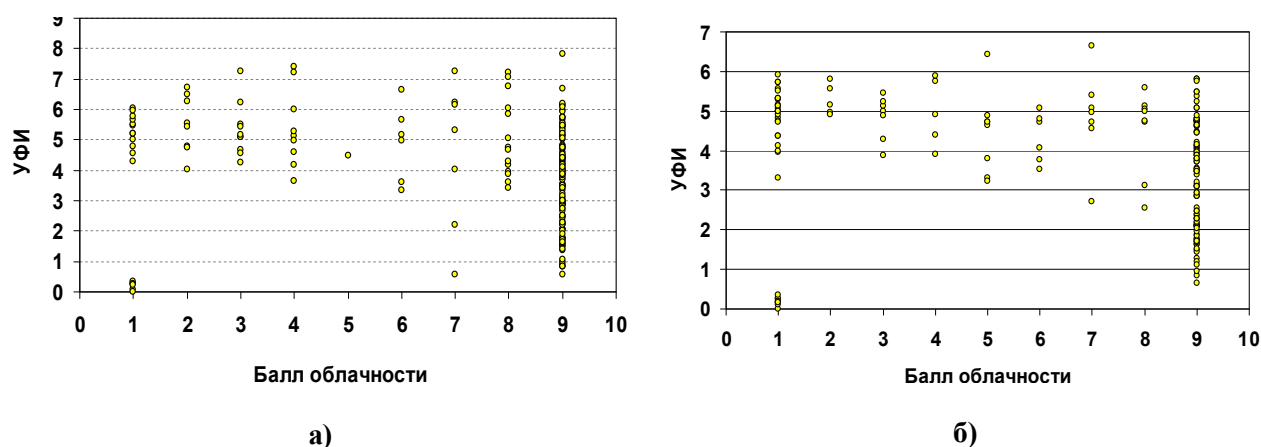


Рис. 2. УФИ и балл общей облачности во Владивостоке (а) и Петропавловске-Камчатском (б).

Как видно, при ясном небе (балл облачности до 3) в обоих пунктах УФИ практически не бывает меньше 4 ед., но максимальных величин УФИ достигает при переменной облачности (4–7 баллов), что подтверждает вклад рассеянной радиации в уровень

ультрафиолетового облучения поверхности. Можно заметить, что при облачности 9–10 баллов во Владивостоке (широта 43° с.ш.) УФИ изменяется от 1 до 8, в Петропавловске-Камчатском (53° с.ш.) от 1 до 6,5 единиц индекса.

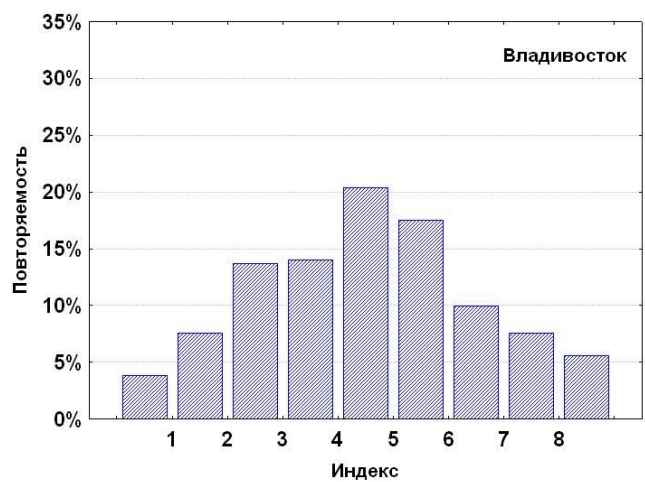
Пространственно-временные особенности высокой УФ-облученности

Сделаны оценки возможного появления опасного ультрафиолетового воздействия на территории России при «идеальных» условиях: безоблачная сухая погода, отсутствие явлений, связанных со значительным увеличением аэрозоля в воздухе (природные и техногенные пожары, вулканическая пыль и др.). Установлено, что УФИ не менее 8 может наблюдаться в июне-июле на территории республик Северного Кавказа, в Краснодарском и Ставропольском краях, Ростовской, Волгоградской и Астраханской областях, Калмыкии, Республике Алтай и Республике Тыва, на юге Бурятии и Забайкальского края. В августе ареал с возможностью появления $УФИ \geq 8$ ограничивается республиками Северного Кавказа, Краснодарским и Ставропольским краями. В средних широтах с мая по август также имеется опасность повышенной УФ-облученности со значением УФИ, равным 6–7.

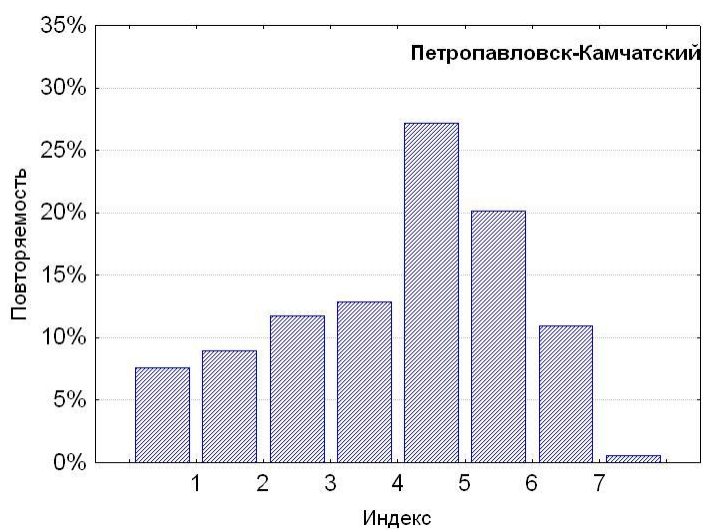
На рис. 3 представлена повторяемость измеренной величины УФИ в трех пунктах, расположенных в разных регионах страны. Видно, что в теплый сезон (с июня по август) высокие значения $УФИ \geq 6$ на юге Дальнего Востока составляют около 25 %, в Москве и Петропавловске-Камчатском – примерно 7 и 12 % соответственно.

Повышенное содержание аэрозоля, свойственное крупным городам, способствует снижению ультрафиолетовой облученности. Но даже в Московском мегаполисе (56° с.ш.), как показано в [7], с мая по июль максимальные величины УФИ могут достигать опасных градаций (6–7), что указывает на возможность неблагоприятного воздействия гелиофизических факторов на здоровье населения Москвы.

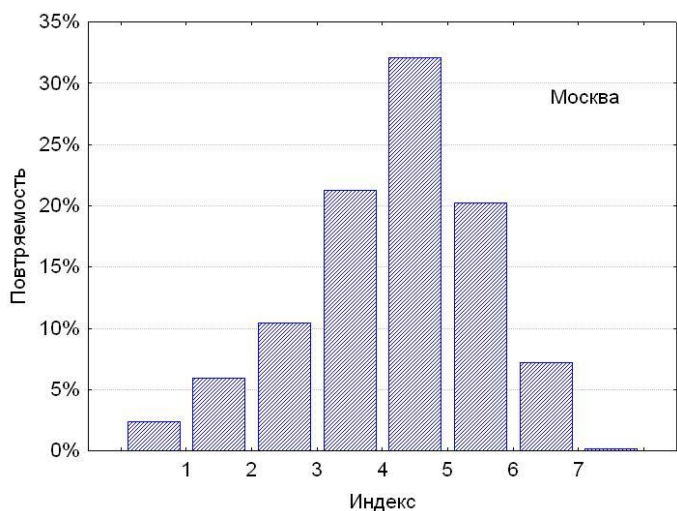
Отметим, что на территории России с сентября по апрель опасность высокой УФ-облученности отсутствует (не рассматриваются высокогорные районы).



а)



б)



в)

Рис. 3. Повторяемость УФИ во Владивостоке (а), Петропавловске-Камчатском (б) и Москве (в) в июне-августе 2010–2013 гг.

Прогнозирование УФИ

Во многих странах наряду с прогнозом погоды составляется прогноз УФИ (например в США, Австралии, большинстве европейских стран) для информирования населения. Ультрафиолетовое излучение и, следовательно, значения УФИ, имеют выраженный суточный ход; максимальное значение ультрафиолетовой радиации наблюдается в 4-часовой период в районе солнечного полудня.

В соответствии с международными нормами УФИ прогнозируется для местного полудня (УФИ_{макс.}), указывая на максимально возможный уровень УФ-облученности в отсутствии облаков. Второй прогнозируемый показатель – УФИ, рассчитанный с учетом прогнозируемого балла облачности в период наибольшей высоты Солнца (УФИ_{обл.}).

В Гидрометцентре России совместно с Центральной аэрологической обсерваторией разработана и реализована технология краткосрочного прогноза УФИ, основанная на расчете УФИ (автор – Н.С. Иванова, <http://method.meteorf.ru/methods/pollut/uv/uv.html>) с использованием прогностических величин ОСО и балла облачности. Прогнозирование ОСО проводится по разработанному авторами статьи методу, утверждённому Центральной методической комиссией по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам Росгидромета (2010 г.). Для технологической устойчивости в настоящее время используются также прогностические величины ОСО, получаемые из NCER.

Автоматизированная технология обеспечивает прогнозирование УФИ на территории России для ясного неба и с учетом балла облачности на текущие и следующие сутки; результаты прогноза визуализируются и представляются на сайте Гидрометцентра России (www.meteoinfo.ru/uvi). На рис. 4 приводится пример прогностической карты УФИ на территории России с учетом облачности на 3 июля 2013 г. На сайте можно также найти информацию о мерах для защиты от негативного воздействия повышенного уровня ультрафиолетовой радиации.

По результатам авторских испытаний метода прогноза УФИ установлено, что методические прогнозы имеют систематическую погрешность (в основном до 1 ед. индекса), возрастающую по территории России с запада на восток. Для уменьшения погрешностей расчетов предполагается использовать характеристики нижней и общей облачности мезомасштабных моделей атмосферы.

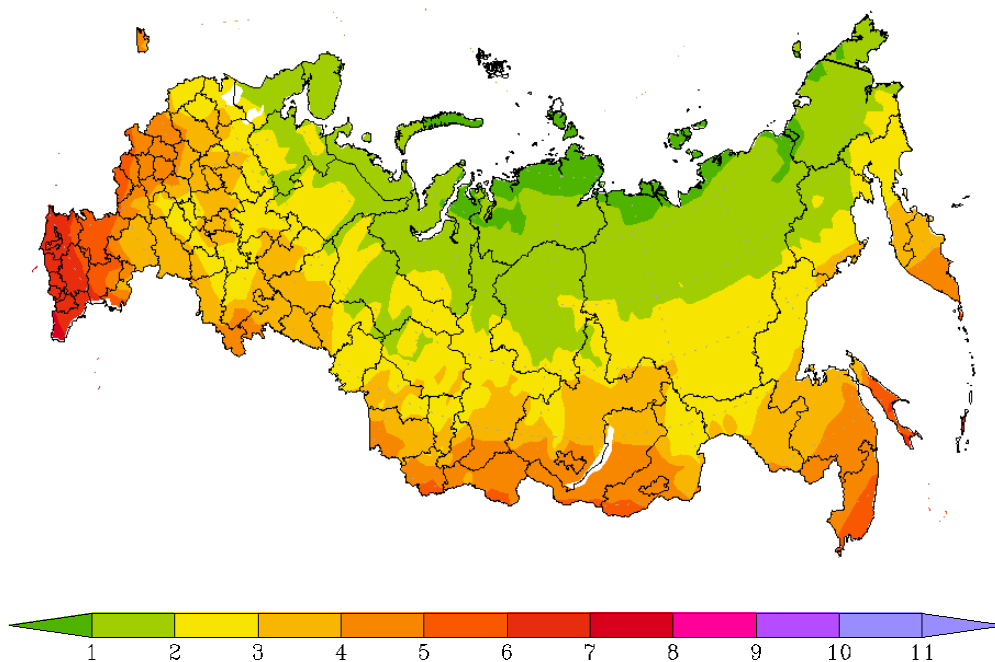


Рис. 4. Пример прогноза УФ-индекса на территории России с учетом облачности.

Выводы

Опасные для здоровья уровни УФ-облученности наблюдаются в южных регионах нашей страны с мая по август с повторяемостью 20–25 %, в умеренных широтах в летние месяцы с частотой от 5 до 12 %.

В Росгидромете создана технология краткосрочного прогнозирования УФИ. В теплый сезон (апрель-сентябрь) информация о максимально возможной УФ-облученности находится в открытом доступе, в экспериментальном режиме представляется на сайте Гидрометцентра России.

В случаях прогнозирования высоких величин УФИ в каком-либо регионе страны составляется текстовое предупреждение об ожидаемом опасном гелиофизическом явлении.

Развитие технологии будет проводиться в двух направлениях: а) усовершенствование расчетных методов, б) увеличение пространственно-временной детализации прогноза УФИ с акцентом на южные широты страны на основе использования прогностических данных моделей с высоким пространственным разрешением.

Список использованных источников

1. *Ананьев Л.Б., Кузнецова И.Н., Нахаев М.И.* Особенности распределения ОСО на территории России по данным ИСЗ (2005–2009 гг.) и их использование для оценки опасности ультрафиолетовой облученности // Труды Гидрометцентра России. – 2010. – Вып. 344. – С. 214–227.
2. *Белинский В.А., Гараджа М.П., Меженная Л.М., Незваль Е.И.* Ультрафиолетовая радиация Солнца и неба. – М.: МГУ, 1968. – 226 с.
3. *Белинский В.А.* Атлас карт распределения ультрафиолетовой радиации на территории СССР / Ультрафиолетовое излучение // под ред. Н.М. Данцига. – М.: Медицина, 1971. – С. 303–309.
4. *Иванова А.Р.* Динамика внутритропической тропопаузы северного полушария: дисс. д.ф.-м.н. – М.:, 2011. – 302 с.
5. *Материалы* сайта Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ). http://www.who.int/uv/intersunprogramme/activities/uv_index/en/index.html.
6. *Моханакумар К.* Взаимодействие стратосферы и тропосферы. – М.: Физматлит, 2011. – 452 с.
7. *Справочник* эколого-климатических характеристик г. Москвы (по наблюдениям Метеорологической обсерватории МГУ). – М.: МГУ, 2003. – Том 1. – 308 с.
8. *Чубарова Н.Е.* Ультрафиолетовая радиация у земной поверхности: дисс. д.г.н. – М.:, 2007. – 375 с.
9. *Чубарова Н.Е., Жданова Е.Ю.* Ультрафиолетовые ресурсы при ясном небе на территории России // Вестник Московского университета. Серия 5. География. – 2012. – № 6. – С. 9–19.
10. *Chubarova N., Zhdanova Ye.* Ultraviolet resources over Northern Eurasia // J. Photochem. Photobiol. B: Biology: Elsevier BV. – 2013. – Vol. 127. – P. 38–51.
11. *Dameris M., Nodorp D., Sausen R.* Correlation between tropopause height pressure and TOMS–data for the EASOE–winter 1991/1992 // Beitr. Phys. Atmosph. – 1995. – Vol. 67, N 3. – P. 227–232.
12. *Giannini S.H.* Effects of changes in stratospheric ozone and global climate. – UNEP/EPA Conference Proceedings, Vol. 2. – 1986. – P. 101–112.
13. Global Solar UV Index. A Practical Guide <http://www.who.int/uv/publications/globalindex/en/index.html>.
14. *Hollows F., Moran D.* Cataract-the ultraviolet risk factor // // Lancet. – 1981. – Vol. 2, N 8258. – P. 1249–1250.
15. *Jose J.G., Pitts D.G.* Wavelength dependency of cataracts in albino mice following chronic exposure // Exp. Eye Res. – 1985. – Vol. 41, N 4. – P. 545–563.
16. *Randel W.J., Cobb J.B.* Coherent variations of monthly mean total ozone and lower stratospheric temperature // J. Geophys. Res. – 1994. – Vol. 99. – P. 5433–5447.
17. *Seckmeyer G., Pissulla D., Glandorf M. et al.* Variability of UV Irradiance in Europe // Photochemistry and Photobiology. – 2008. – Vol. 84. – P. 172–179.

18. *Steinbrecht W., Claude H., Koehler U., Hoinka K.P.* Correlation between tropopause height and total ozone: Implications for long-term trends // *J. Geophys. Res.* – 1998. – Vol. 103. – P. 19183–19192.

19. *Torres O., Tanskanen A., Veihelmann B., Ahn C., Braak R., Bhartia P.K., Veeffkind P., Levelt P.* Aerosols and surface UV products from Ozone Monitoring Instrument observations: An overview // *J. Geophys. Res.* – 2007. – Vol. 112. – D24S47. – doi:10.1029/2007JD008809.

20. *Urbach F.* Potential effects of altered solar ultraviolet radiation on human skin cancer // *Photochem. and Photobiol.* – 1989. – Vol. 50, N 4. – P. 507–513.

Поступила в редакцию 07.05.2014 г.