

УДК 504.3.054;504.32

БИОЛОГИЧЕСКИ АКТИВНАЯ УЛЬТРАФИОЛЕТОВАЯ РАДИАЦИЯ В 21-М ВЕКЕ

© 2023 г. И. К. Ларин*

Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семёнова Российской академии наук,
Москва, Россия

*E-mail: iklar@narod.ru

Поступила в редакцию 28.03.2022;
после доработки 14.04.2022;
принята в печать 20.04.2022

Представлены данные о содержании озона в июне и январе 1980 и 2100 годов, полученные с помощью двумерной интерактивной модели средней атмосферы SOCRATES. На основании этих данных с помощью программы “Fast simulation of downward UV doses, indices and irradiances at the Earth’s surface”, разработанной в Норвежском институте атмосферных исследований, рассчитано изменение основных факторов биологически активной солнечной радиации к концу 21-го века, включая данные, связанные с образованием эритемы и витамина D у человека. Показано, что параметры биологически активной радиации к концу 21-го века могут измениться по сравнению с 1980-м годом, однако это не создаст существенной угрозы для здоровья человека.

Ключевые слова: солнечная радиация, эритема, витамин D, УФ-индекс, здоровье человека.

DOI: 10.31857/S0207401X23010077, **EDN:** MWUXQH

ВВЕДЕНИЕ

28 июня 1974 года вышел очередной номер журнала Nature, в котором американские химики Марио Молина и Шерри Роуланд высказали предположение о возможном истощении озонового слоя в результате воздействия на него производимых человеком и широко используемых хлорфторуглеродов (фреонов) [1]. Сразу вслед за этим появились еще две статьи тех же авторов и Крутцена, в которых прогнозировалось, что дальнейшее использование хлорфторуглеродов может уменьшить атмосферное содержание озона на 15–20% [2, 3].

Подобное истощение озонового слоя должно было привести к критическому увеличению уровня биологически опасного солнечного ультрафиолетового (УФ) излучения вблизи земной поверхности с неизбежными отрицательными последствиями для земной биосферы и окружающей среды в целом. Именно эта опасность, а также то обстоятельство, что жизнь на земной поверхности появилась 400 миллионов лет тому назад только после образования в атмосфере достаточно плотного слоя озона (всего на 15–20% меньше современного) [4], послужили основанием для принятия беспрецедентных международных соглашений (Монреальский протокол [5]) по ограничению производства озоноразрушающих веществ в целях сохранения озонового слоя Земли и

земной биосферы. Эти меры позволили избежать катастрофического разрушения озонового слоя (хотя в некоторой степени оно действительно имело место в конце 20-го столетия). Самое же замечательное в этой истории заключается в том, что озоновый кризис был научно предсказан за 10 лет до его появления [6], за что Роуланд, Молина и Крутцен получили Нобелевскую премию по химии в 1995 году. Хотя озонового кризиса удалось избежать, в 21-м веке прогнозируется дальнейшая эволюция озонового слоя. Имея в виду тесную связь атмосферного озона с УФ-радиацией, представляется важным рассмотреть, как эта эволюция может отразиться на уровне УФ-радиации на земной поверхности.

После этой исторической справки переходим к сути дела. Как уже было сказано выше, солнечная УФ-радиация, поступающая на поверхность Земли, оказывает существенное влияние на окружающую среду, экологию и биоту, включая человека. В зависимости от характера этого влияния различают три спектральных области биологически активной УФ-радиации (БАУФР), которые вместе с описанием их характеристик приведены в табл. 1.

Как следует из данных, приведенных в табл. 1, УФ-В-излучение может оказывать как положительное (через образование витамина D), так и отрицательное (через образование эритемы и ра-

Таблица 1. Три области коротковолнового солнечного излучения и их свойства

Излучение	Диапазон длин волн, нм	Свойства излучения
УФ-А	320–400	не обладает канцерогенным действием; достигает земной поверхности вызывает загар, образование витамина D, эритему, катаракту и рак кожи (при повышенных дозах); достигает земной поверхности
УФ-В	290–320	
УФ-С	200–290	полностью поглощается атмосферой; на поверхности рождается только искусственными источниками; вызывает эритему, катаракту и рак кожи

ка кожи) влияние на живые организмы [7]. Таким образом, основной биологической проблемой воздействия УФ-излучения на человека становится проблема различения этих эффектов и, по возможности, определение условий, при которых преимущественным эффектом является образование витамина D, а не эритемы и рака кожи. К счастью, эта проблема имеет свое аналитическое решение – через использование так называемых спектров действия, которые задают разную спектральную эффективность для разных биологических эффектов и, таким образом, позволяют количественно выявить различие между ними. Такие расчеты можно выполнить с помощью формулы

$$F_{bio} = \int_{280}^{400} F_{\lambda} Q_{\lambda} d\lambda, \quad (1)$$

где λ – длина волны в нм; F_{λ} – спектральная плотность потока солнечного излучения вблизи земной поверхности с длиной волны λ , выраженная в единицах $Вт \cdot м^{-2} \cdot нм^{-1}$; Q_{λ} – спектр биологического действия (безразмерная величина); F_{bio} – поток специфической биологической радиации, выраженный в тех же единицах, что и F_{λ} , но без $нм^{-1}$ (т.е. в единицах $Вт \cdot м^{-2}$, поскольку $нм^{-1}$ “пропал” после интегрирования по λ). Сама величина $F(\lambda)$ может быть рассчитана по формуле

$$F(\lambda) = F_0(\lambda) \exp \left\{ -\sec(\chi) \sigma(\lambda) \int_{z=0}^{z=\infty} n(z) dz \right\}, \quad (2)$$

где $F_0(\lambda)$ – внеатмосферный поток солнечного излучения с длиной волны λ , χ – солнечный зенитный угол (угол между вертикалью и направлением на Солнце), $n(z)$ – концентрация поглощающей компоненты на высоте z , $\sigma(\lambda)$ – сечение поглощения выбранной компоненты. В формуле (2) предполагается, что изменение солнечного потока происходит только в результате его взаимодействия с газовыми молекулами, причем в качестве таковых в диапазоне $\lambda = 200–320$ нм достаточно учесть только молекулы озона. В условиях реальной атмосферы следует учитывать влияние на солнечное излучение и некоторых других газовых компонентов, а также аэрозольных частиц [8].

В качестве примера спектров действия на рис. 1 приводятся спектры действия образования эритемы и витамина D, полученные с помощью программы “Fast simulation of downward UV doses, indices and irradiances at the Earth’s surface”, описанной в [9]. Самой замечательной особенностью данных, представленных на рис. 1, является то, что в некоторой области длин волн (в диапазоне $\lambda \approx 300–320$ нм) спектр действия образования витамина D лежит выше спектра образования эритемы. Это означает, что в этом диапазоне длин волн солнечное излучение будет преимущественно образовывать витамин D, а не эритему. Другими словами, здесь солнечное излучение может оказать благоприятное действие на здоровье человека. Не будь этого счастливого различия между спектрами действия, никакое положительное влияние солнечной радиации на здоровье человека в принципе не было бы возможно (в предположении, что образование эритемы всегда вредит здоровью, а образование витамина D ему благоприятствует). Правда, несколько забегая вперед, следует сказать, что спектры действия помогают не всегда, и при некоторых обстоятельствах доза образования необходимого количества витамина D может оказаться выше эритемной дозы, о чем более подробно будет сказано ниже.

Вернемся теперь к формуле (1) и посмотрим, какую новую информацию можно извлечь из сказанного о спектрах действия. В этой формуле мы имеем две функции: спектр биологического действия, падающий с ростом λ , и интенсивность УФ-излучения, F_{λ} , растущую с ростом λ . Понятно, что максимальное излучение (т.е. максимум F_{bio}) будет в области, где эти функции близки, а его количественную величину можно получить, проинтегрировав произведение $F_{\lambda} Q(\lambda)$ в выбранном диапазоне длин волн. Таким образом, по своему физическому смыслу (и размерности) F_{bio} можно рассматривать как мощность соответствующего биологического действия УФ-излучения. Следовательно, интегрируя величину F_{bio} по времени, можно получить среднечасовые, среднедневные и так далее дозы эффективного УФ-В-излучения для данного биологического процесса (размерность – энергия/площадь, как правило, $Дж \cdot м^{-2}$).

Поскольку далее основное внимание будет уделено образованию эритемы и витамина D у человека, имеет смысл ввести номенклатуру основных единиц, характеризующую эти биологические эффекты. Согласно [10] минимальная дневная эритемная доза (1 MED) для второго типа кожи (по [11]) составляет $250 \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-2}$. Получение такой дозы вызывает покраснение кожи в течение 24 ч. Ко второму типу кожи (по [11]) относятся люди с белой кожей, блондины, рыжеволосые, с голубыми или зелеными глазами, которые обычно обгорают на солнце и плохо загорают. Все наши расчеты будут относиться именно к этому типу кожи, поэтому другие типы мы описывать не будем. Укажем только, что для I–VI типов кожи 1 MED равен 200, 250, 300, 450, 600 и $1000 \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-2}$ соответственно [12].

Важной особенностью эритемной радиации является то обстоятельство, что ее действие не зависит от доли поверхности кожи человека, доступной солнечным лучам, и приведенная выше доза в 1 MED будет иметь место при любой степени открытости поверхности кожи человека. Доза в 1 MED означает, что для покраснения кожи человека в течение 24 ч 1 м^2 его кожи должен поглотить энергию в 250 Дж. Если облучается не 1 м^2 , а 1 см^2 , то для того же эффекта понадобится энергии в 10^4 раз меньше. Поэтому для эритемы зависимости от степени открытости кожи человека солнечным лучам нет.

В качестве стандартной дневной дозы облучения, необходимой для образования витамина D (SDD), согласно [12–14], для второго типа кожи выбирается величина в $109.4 \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-2}$ при 25%-ной доле поверхности кожи человека, доступной солнечному свету. В отличие от эритемы, величина SDD зависит от степени открытости кожи человека солнечному свету. Наличие этой зависимости объясняется тем, что для образования определенного количества витамина D, необходимого человеку для нормального функционирования его организма, солнечный свет должен совершить определенную работу, которая расходуется на проведение сложной цепочки химических реакций, конечным продуктом которых является витамин D. Величина энергии, необходимой для образования определенного (известного) количества витамина D (обозначим ее как E_D) в коже человека площадью S , рассчитывается через произведение удельной энергии, равной 1 SDD, на площадь S , т.е. $E_D = 1 \text{ SDD} S$, или $1 \text{ SDD} = E_D/S$. Отсюда следует, что величина одной дозы SDD будет изменяться обратно пропорционально степени открытости кожи человека солнечным лучам.

Упомянутая выше программа [9], которую мы будем использовать в дальнейшем, позволяет рассчитывать интенсивность приходящего к земной поверхности солнечного излучения в спек-

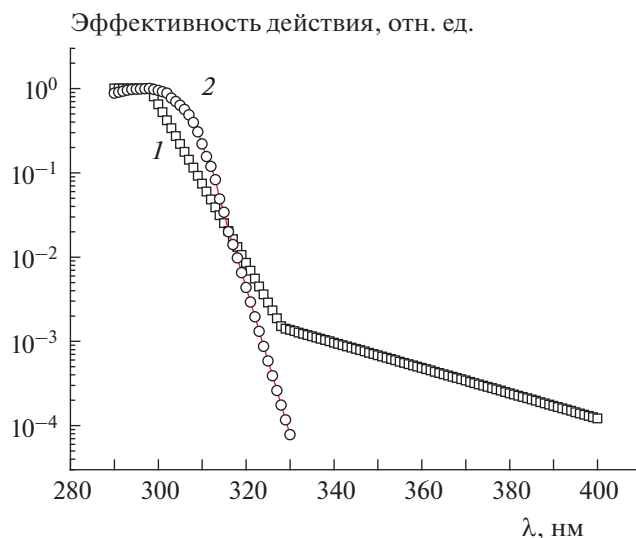


Рис. 1. Спектры действия образования эритемы (1) и витамина D (2).

тральном диапазоне 290–400 нм в зависимости от различных радиационных параметров, таких, как солнечный зенитный угол, содержание озона, оптические толщины облаков и аэрозолей, отражательная способность поверхности и некоторые другие. Помимо спектров действия, о чем говорилось выше, программа позволяет рассчитать 23 эффекта БАУФР, включая общее количество энергии УФ-А- и УФ-В-областей, а также время получения одной дозы эритемы и образования витамина D, дозы поражения ДНК, дозы рака кожи, УФ-индексы и т.д.

РАСЧЕТ ЭФФЕКТОВ БАУФР в 21-м ВЕКЕ

В качестве эффектов БАУФР рассматривались: 1) данные об УФ-индексах, которые получали с помощью программы, описанной в [9], 2) данные о дозах образования витамина D (программа из [9]), 3) данные о времени пребывания на солнце для получения дозы в 1 SDD и 1 MED, которые получали с помощью программы, описанной в [12].

УФ-индексы. УФ-индекс — это международный стандарт интенсивности УФ-излучения, вызывающего эритему. Шкала была разработана канадскими учеными в 1992 году, а затем принята и стандартизирована Всемирной организацией здравоохранения ООН и Всемирной метеорологической организацией в 1994 году [15]. Значение УФ-индекса определяется путем деления мощности дозы эритемного излучения (в единицах $\text{млВт}/\text{м}^2$) на произвольную величину в $25 \text{ млВт}/\text{м}^2$. Это дает число, которое обычно колеблется от 0 (нет солнечного света) до 11+. Если УФ-индекс выше трех, то такой уровень УФ-радиации считается

Таблица 2. Среднеширотное общее содержание озона в единицах Добсона для июня и января 1980 и 2100 гг., рассчитанное по сценарию RCP 4.5 в диапазоне высот 0–55 км

Широта, °с.ш.	Июнь 1980 г.	Июнь 2100 г.	Январь 1980 г.	Январь 2100 г.
0	245.1	252.2	249.6	256.7
5	248.5	255.6	254.5	262.0
10	254.0	261.0	262.8	270.5
15	261.4	268.5	273.5	282.2
20	271.0	278.3	286.1	295.8
25	283.5	291.2	299.3	310.7
30	299.2	307.2	311.8	324.9
35	317.9	326.1	322.0	337.0
40	338.4	347.1	331.5	348.1
45	359.3	368.6	342.3	360.0
50	377.9	387.5	355.4	374.2
55	391.6	401.0	371.8	391.6
60	397.3	406.3	392.1	413.3
65	393.6	401.7	415.3	437.4
70	383.4	390.7	437.5	460.2
75	371.5	378.4	452.9	475.8
80	360.1	366.8	460.0	483.7
85	352.5	359.1	462.2	486.7

опасным для человека со вторым типом кожи и ему необходима защита от солнца [8].

Все биологические расчеты проводились с помощью программы из [9] для безоблачных условий при альбедо поверхности, равном 0.3 на всех широтах, для второго типа кожи при 25%-ной доле ее открытости для солнечных лучей, околополуденного времени, вблизи земной поверхности. В этих условиях основными параметрами, влияющими на уровень радиации, становились содержание озона (в единицах Добсона), приведенное в табл. 2, и зенитный угол, изменяющийся в течение дня и сезона года.

Расчеты атмосферного содержания озона на широтах от 0 до 85° с.ш. для высот 0–55 км в июне и январе 1980 и 2100 гг. проводились с помощью интерактивной двумерной модели SOCRATES [16]. В качестве начальных данных для расчетов озона использовались прогнозы атмосферного содержания парниковых газов Межправительственной группы экспертов по изменению климата RCP 4.5 для 1980 и 2100 гг. [17]. В табл. 2 представлены результаты расчетов общего содержания озона в столбе в единицах Добсона для указанных выше условий, которые использовались в биологических расчетах. Напомним, что основной задачей работы была попытка обнаружить те изменения в биологически активной ультрафиолетовой радиации, которые могут иметь место в конце 21-го века по сравнению с 1980 годом,

когда антропогенные хлорфторуглероды еще не оказывали влияния на озоновый слой Земли.

На рис. 2 показаны рассчитанные по программе из [9] значения УФ-индексов для июня и января 1980 и 2100 гг. на широтах 0–85° с.ш. (сценарий RCP 4.5). Можно видеть, что кривые УФ-индексов для 2100 г. на данной широте и в июне, и в январе смещены в сторону их меньших значений по сравнению с кривыми для 1980 г. Это объясняется тем, что общее содержание озона в 2100 году превосходит таковое в 1980 году (см. табл. 2). Однако при значении УФ-индекса, равном трем и соответствующем граничному значению эритемной дозы для людей со вторым типом кожи, это различие слишком невелико, чтобы принимать его во внимание. И хотя на широте ≈15° с.ш. оно и достигает заметной величины в 0.5 в июне месяце, однако здесь УФ-индекс слишком велик, чтобы думать о различиях кривых, вместо того, чтобы принимать защитные меры.

Из других особенностей данных, представленных на рис. 2, отметим рост УФ-индекса с ростом широты в июне месяце в низких широтах и достижение им максимума на широте 15° с.ш. Этот рост объясняется наклоном земной оси относительно плоскости орбиты на 23°, а также тем обстоятельством, что в июне (а точнее, для 20 июня, когда проводились июньские расчеты) минимальный зенитный угол (а, следовательно, и максимальный УФ-индекс) будет сдвинут в северное полу-

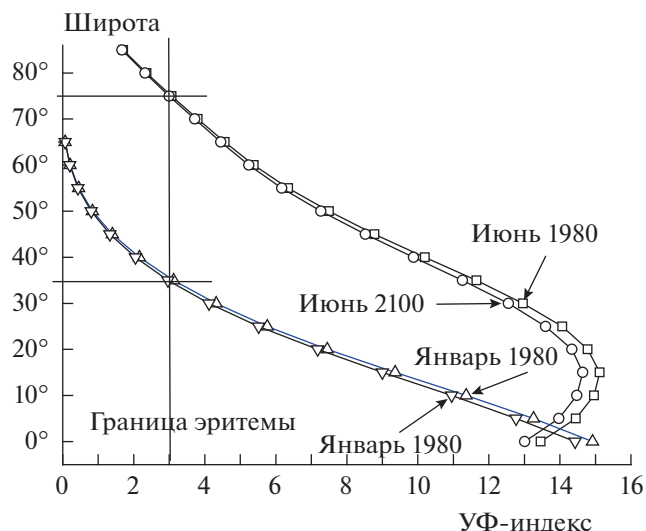


Рис. 2. УФ-индексы для июня и января 1980 и 2100 гг. на широтах 0–85° с.ш., рассчитанные по сценарию RCP 4.5.

шарие. Однако максимальный УФ-индекс имеет место не на широте 23° с.ш., а на широте 15° с.ш. Это объясняется тем, что одновременно с ростом широты происходит рост общего содержания озона, что ведет к уменьшению потока УФ-излучения, а значит, и УФ-индекса. В результате максимум имеет место не на широте 23° с.ш., а несколько южнее. Отметим также, что на широте 0° с.ш. январский УФ-индекс несколько больше

июньского. Это же объясняется наклоном земной оси, а также тем, что 21 января, когда проводились январские расчеты, день зимнего солнцестояния (21 декабря) остался позади и солнце сдвинулось к северу. В результате на широте 0° с.ш. январский зенитный угол солнца (20.28°) оказался несколько меньше июньского (23.43°), а поток УФ-излучения и УФ-индекс – несколько больше.

Образование витамина D. Образование витамина D рассчитывалось через число дневных доз SDD, которое определялось как частное от деления дневной дозы радиации, способствующей образованию витамина D (программа [9]), на 109.4 Дж · м⁻², что соответствует одной дозе SDD [14]. На рис. 3 показана зависимость числа дневных доз образования витамина D (SDD) от широты в диапазоне 0–85° с.ш. для июня (с разрывом на вставку) и января 1980 и 2100 гг., рассчитанных по сценарию RCP 4.5. На вставке рис. 3 приведены те же данные в диапазоне 0–2 дозы SDD для января 1980 и 2100 гг. в широтном диапазоне 65–50° с.ш. Расчеты с помощью программы из [9] проводились для тех же условий, что и указанные выше. Данные по содержанию озона брали из табл. 2.

Как видно из рис. 3, число доз SDD в 2100 году на всех широтах меньше такового в 1980 году, что объясняется большим содержанием озона в 2100 году по сравнению с 1980 годом (напомним, что данные 1980 года соответствуют условиям неразрушенного фреонами озонового слоя, а данные 2100 года – условиям, при которых эволюция озо-

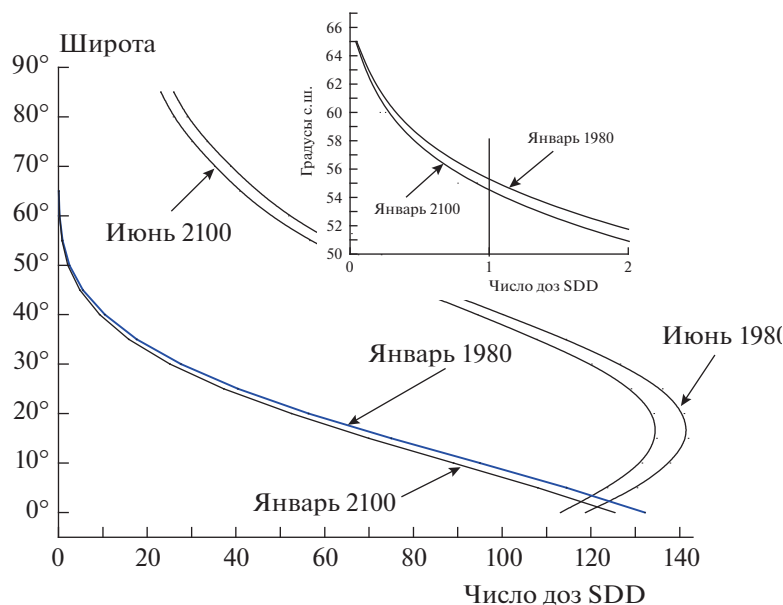


Рис. 3. Числа дневных доз образования витамина D (SDD) в широтном диапазоне 0–85° с.ш. для июня и января 1980 и 2100 гг., рассчитанные по сценарию RCP 4.5. На вставке показаны те же данные в диапазоне значений доз SDD 0–2 для января месяца 1980 и 2100 гг. в том же широтном диапазоне.

нового слоя не зависит от влияния фреонов). Максимальная разница между июньскими данными 2100 и 1980 гг. на широте 15° с.ш. составляет около 7 доз SDD при абсолютной величине ≈ 140 доз SDD. Видно также, что максимум июньских данных имеет место не на широте 0° с.ш., а около 15° с.ш., что, как и выше, объясняется наклоном земной оси к плоскости орбиты. Той же причиной объясняется и превосходство январских доз над июньскими на широте 0° с.ш. Видно также, что число июньских доз витамина D на всех широтах в 1980 и 2100 гг. существенно больше единицы. Что касается январских данных, то, как это можно видеть на вставке на рис. 3, севернее 55° с.ш. дневная доза образования витамина D становится меньше 1 SDD, причем граница получения одной дозы SDD в 2100 году смещается примерно на один градус к югу. Пожалуй, это единственное значимое следствие эволюции озонового слоя в конце 21-го столетия, имеющее значение для образования витамина D у человека под действием солнечного ультрафиолетового излучения, поскольку вряд ли можно считать таковым различие в дозовых кривых 2100 и 1980 гг., когда человек и так получает существенно больше витамина D, чем ему нужно для нормальной жизни.

Время получения доз 1 SDD и 1 MED. Выше было показано, что в июне в средних широтах человек в течение дня получает десятки доз SDD (при том, что в принципе ему достаточно было бы и одной). Однако этому избытку витамина D не стоит радоваться, поскольку вместе с большим количеством последнего человек получает существенную эритемную дозу, и не ясно, каково при этом будет соотношение пользы и вреда для здоровья. Во всяком случае данные, представленные на рис. 3, не могут помочь решить эту задачу.

Ее можно решить с помощью специально разработанной программы, описанной в [12], которая позволяет рассчитать время пребывания человека на солнце для получения одной дозы SDD и одной дозы MED для разных условий. Помимо начальных параметров, которые используются в программе из [9], программа из [12] дополнительно учитывает тип кожи человека и степень открытости кожи солнечным лучам. Расчеты с помощью программы из [12] выполнялись для второго типа кожи и 25%-ной степени открытости кожи солнечному свету. В связи с этим укажем относительную площадь разных частей тела: голова и шея человека – 9%, руки – 18%, ноги – 36% [8]. Остальные параметры расчетов были такими же, как и выше.

Результаты расчетов приводятся в табл. 3. Они означают следующее. Если, например, время пребывания на солнце для получения одной дозы SDD в околополуденное время составляет 0:09 мин, а одной фазы MED – 0:31 мин (июнь 1980 г., 60° с.ш.),

то это означает, что находясь на солнце в течение 30 мин, человек успеет получить одну дозу SDD (на самом деле – почти 3.5 дозы SDD), и не получить дозу в 1 MED. Другими словами, время пребывания на солнце, указываемое в колонке “MED”, является тем предельным безопасным временем пребывания на солнце, при котором человек получает достаточное количество витамина D, не получая эритемы. Фактически данные табл. 3 можно рассматривать как расписание безопасного пребывания на солнце на данной широте в местное околополуденное время для получения наибольшей пользы для здоровья от солнечного ультрафиолета. Однако сказанное верно только для второго типа кожи при 25%-ной степени открытости тела солнечным лучам. При изменении степени открытости соотношение времен для образования витамина D и эритемы будет изменяться, что более подробно мы обсудим ниже.

Что касается конкретных данных, приведенных в табл. 3, то прежде всего можно видеть, что при всех условиях времени получения одной дозы SDD меньше времени получения одной дозы MED, что объясняется разницей в необходимой энергии: $109.4 \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-2}$ для витамина D против $250 \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-2}$ для эритемы (для второго типа кожи). Стоит также напомнить, что зенитный угол солнца изменяется по широте так, как описано выше: в июне на низких широтах он падает, затем растет, в январе растет на всех широтах, начиная с 0° с.ш., как и общее содержание озона, что оказывает известное влияние на величину рассчитываемых эффектов.

Видно также, что в июне 1980 и 2100 гг. время получения одной дозы SDD на широтах $0-35^\circ$ с.ш. одно и то же и составляет всего 4 мин, и даже на широте 85° с.ш. оно возрастает всего до 33 мин, хотя, конечно, при температуре -25°C особенно не позагораешь. В конце 21-го века июньские значения времени получения доз (и SDD, и MED) несколько возрастают на широтах выше 50° с.ш.

Что касается январских данных, то отметим прежде всего, что в январе и 1980, и 2100 гг. на широтах $0-50^\circ$ с.ш. возможно получение одной дозы SDD, хотя времена на этих широтах будут, естественно, больше, чем в июне. Кроме того, имеется значительная разница во временах образования 1 SDD и 1 MED, которая увеличивается по широте, особенно в 2100 году. Укажем также, что в январе на всех широтах, начиная с 0° с.ш., и зенитный угол, и содержание озона растут, совместно вызывая уменьшение интенсивности излучения и рост времен. В 2100 году времена получения единичных доз SDD и MED заметно увеличиваются севернее 30° с.ш., а выше 50° с.ш. программа перестает выдавать какие либо данные. Но не из-за полярной зимы, а потому что рассчитываемые дозы SDD и MED из-за роста зенитного угла и

Таблица 3. Время пребывания на солнце для получения 1 SDD и 1 MED (часы:минуты) в июне и январе 1980 и 2100 гг. (второй тип кожи, 25%-ная доля открытости кожи солнечному свету)

Широта, °с.ш.	Июнь 1980 г.		Июнь 2100 г.		Январь 1980 г.		Январь 2100 г.	
	SDD	MED	SDD	MED	SDD	MED	SDD	MED
0	0:04	0:12	0:04	0:13	0:04	0:11	0:04	0:11
5	0:04	0:11	0:04	0:11	0:04	0:12	0:04	0:13
10	0:04	0:11	0:04	0:11	0:04	0:14	0:05	0:15
15	0:04	0:11	0:04	0:11	0:05	0:17	0:05	0:18
20	0:04	0:11	0:04	0:11	0:06	0:22	0:07	0:23
25	0:04	0:11	0:04	0:12	0:08	0:29	0:08	0:30
30	0:04	0:13	0:04	0:13	0:11	0:38	0:11	0:40
35	0:04	0:14	0:04	0:14	0:16	0:53	0:17	0:56
40	0:05	0:16	0:05	0:17	0:24	1:18	0:26	1:22
45	0:05	0:19	0:05	0:19	0:44	2:04	0:49	2:11
50	0:07	0:22	0:07	0:23	1:35	3:52	2:01	4:25
55	0:07	0:26	0:08	0:27				
60	0:09	0:31	0:09	0:32				
65	0:10	0:37	0:11	0:37				
70	0:13	0:44	0:13	0:44				
75	0:16	0:54	0:17	0:55				
80	0:22	1:10	0:23	1:12				
85	0:33	1:38	0:35	1:40				

общего содержания озона становятся меньше граничных значений (см. Введение).

В заключение остановимся на вопросе о том, как приведенные в табл. 3 времена зависят от степени открытости тела солнечным лучам. Собственно, как мы теперь знаем, зависят только времена получения одной дозы SDD, а для одной дозы MED такая зависимость отсутствует. Выше, во Введении, уже говорилось, что эритемная доза не зависит от степени открытости тела, а доза образования витамина D обратно пропорциональна степени открытости тела. Отсюда ясно, что при уменьшении степени открытости тела доза образования витамина D будет расти, а вместе с ней будет расти и время получения такой дозы. Поскольку время получения 1 MED не изменяется, то при некоторой, достаточно малой величине степени открытости тела время образования 1 SDD станет больше времени образования 1 MED. Понятно, что эта граничная степень открытости зависит от всех параметров, влияющих на интенсивность радиации, приходящей на земную поверхность. Но в иллюстративных целях мы можем выбрать некий набор известных нам параметров, которые уже использовались выше, и определить для них эту границу. Пусть, например, широта равна 50° с.ш., время – июнь 2100 г., тип кожи – второй, остальные параметры те же, что использовались при расчетах с помощью программы из [12]. Тогда по-

лучаем, что при степени открытости тела в 6% время получения 1 SDD составляет 24 мин, а 1 MED – 23 мин (см. табл. 3.). При дальнейшем уменьшении степени открытости разница будет увеличиваться. Отметим в связи с этим примером, что степень открытости менее 6% не является редкой. Так, по данным [12] относительная площадь лица составляет 3.5%, а шеи – 2%. Понятно, что при степени открытости в 6% и меньше никакой пользы здоровью ультрафиолетовое излучение солнца принести не может.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выполнены расчеты общего содержания озона (как фактора, влияющего на эффекты БАУФР) в июне и январе месяце 1980 и 2100 гг. в диапазоне широт 0–85° с.ш. Показано, что в июне 2100 г. общее содержание озона превосходит таковое для 1980 года на 2–3%, а в январе – на 3–5.4%.

2. Выполнено сравнение эффектов БАУФР в 2100 и 1980 гг., включая УФ-индексы, дозы образования витамина D, времена получения одной дозы витамина D (SDD) и одной дозы эритемы (MED). Показано, что во всех случаях эффекты БАУФР в 2100 году изменились по сравнению с 1980 годом: УФ-индексы уменьшились на 4–6% летом и на 5–7% зимой; образование витамина D уменьшилось на 4–11% летом и на 5–14% зимой;

времена получения доз SDD и MED возросли: летом на 0–6%, зимой на 0–25% для SSD и летом на 0–2%, зимой на 0–14% для MED.

3. Тем не менее можно заключить, что эволюция озонового слоя в 21-м веке не привела к существенным изменениям в эффектах БАУФР, влияющим на здоровье человека. Это означает, что в конце 21-го века не потребуется каких-либо дополнительных мер по защите человека от солнечной радиации по сравнению с теми мерами, которые используются в настоящее время.

Работа выполнена при поддержке госзаданием ИНЭП ХФ РАН им. В.Л. Тальрозе (регистрационный номер АААА-0047-2018-0012).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Molina M.J., Rowland F.* // Nature. 1974. V. 249. P. 810.
2. *Crutzen P.J.* // Geophys. Res. Lett. 1974. V. 1. P. 205.
3. *Rowland F., Molina M.* // Rev. Geophys. Space Phys. 1975. V. 13. P. 1.
4. *Wayne R.P.* Chemistry of Atmospheres. 2nd ed. Oxford, U.K.: Clarendon Press, 1991. P. 806.
5. https://ru.wikipedia.org/wiki/Монреальский_протокол
6. *Роун Ш.* Пятнадцатилетняя эволюция неожиданной глобальной опасности. Пер. с англ. М.: Мир, 1992. С. 320.
7. UNEP. Environmental effects of ozone depletion and its interactions with climate change: Assessment, 2014 // J. Photochem. Photobiol. Sci. 2015. P. 7–184.
8. *Жданова Е.Ю.* Дис. ... канд. геогр. наук. М.: МГУ, 2016
9. *Engelsen O., Kylling A.* // Opt. Engin. 2005. V. 44 Issue 4. 041012.
10. Rationalizing nomenclature for UV doses and effects on humans. WMO/GAW Report N 211. Vienna, Austrian: Commission Internationale de l'Eclairage (CIE), 2006.
11. *Fitzpatrick T.B.* // Arch. Dermatol. 1988. V. 124. P. 869.
12. *Webb A.R., Engelsen O.* // Photochem. Photobiol. 2006. V. 82. Issue 6. P. 1697.
13. *Terushkin V., Bender A., Psaty E.L., Engelsen O., Wang S.Q., Halpern A.C.* // J. Amer. Acad. Dermatol. 2010. V. 62. Issue 6. P. 929. e1.
14. *Dowdy J.C., Sayre R.M., Holick M.F.* // J. Steroid Biochem. Molec. Biology. 2010. V. 121. Issue 1–2. P. 328.
15. World Meteorological Organization Global Atmosphere Watch. Report No 95, 1994.
16. <http://acd.ucar.edu/models/SOCRATES/>
17. <http://tntcat.iiasa.ac.at:8787/RcpDb/dsd?Action=htmlpage&page=welcome>