

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени М.В.Ломоносова  
ГЕОГРАФИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ**



*На правах рукописи*

*УДК 551.521.17*

**ЖДАНОВА Екатерина Юрьевна**

**ОЦЕНКИ РЕСУРСОВ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОЙ  
РАДИАЦИИ, ВЛИЯЮЩЕЙ НА ЗДОРОВЬЕ ЧЕЛОВЕКА, В  
СЕВЕРНОЙ ЕВРАЗИИ**

Специальность 25.00.30 — метеорология, климатология и агрометеорология

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата географических наук

Москва – 2016

Работа выполнена на кафедре метеорологии и климатологии географического факультета ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова»

**Научный руководитель:**

**Чубарова Наталья Евгеньевна** - доктор географических наук, профессор кафедры метеорологии и климатологии географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

**Официальные оппоненты:**

**Ларин Игорь Константинович** - доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт энергетических проблем химической физики им. В.Л. Тальрозе Российской академии наук

**Постыляков Олег Вадимович** - кандидат физико-математических наук, заведующий сектором Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физики атмосферы им. А.М.Обухова Российской академии наук

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт географии Российской академии наук

Защита состоится «**19**» мая **2016 г. в «15» часов** на заседании диссертационного совета Д 501.001.68 при Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова по адресу: 119991, г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы, ГЗ МГУ, географический факультет, 18 этаж, ауд. 1801.

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной научной библиотеке Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова по адресу Ломоносовский проспект, д. 27, А8. Диссертация и автореферат размещены на сайте географического факультета Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова: [www.geogr.msu.ru](http://www.geogr.msu.ru). Отзывы на автореферат (в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения) просим направлять по адресу: 119991, г.Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д.1, ГЗ МГУ имени М.В.Ломоносова, географический факультет, ученому секретарю диссертационного совета Д 501.001.68, e-mail: [science@geogr.msu.ru](mailto:science@geogr.msu.ru), факс: +74959328836

Автореферат разослан «        » марта 2016 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 501.001.68,  
доктор геолого-минералогических наук, профессор

Савенко В.С.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность исследования

Ультрафиолетовая радиация (УФР) оказывает существенное влияние на здоровье человека, в том числе на кожу, глаза, иммунную систему (UNEP, 2014). С одной стороны, избыточное УФ-облучение может привести к серьезным заболеваниям кожи (рак кожи) и глаз (фотокератит, катаракта, конъюнктивит и др.), с другой стороны, 90% витамина D, необходимого для здоровья, образуется в организме человека под воздействием УФР (Holick, 2004).

Для характеристики потенциальной опасности УФР для здоровья человека наиболее часто используется эритемная УФР с максимумом эффективности в УФ-В области спектра (эритема - покраснение кожи незагорелого человека). Для оценок доз эритемной УФР, поступающих к поверхности Земли, применяют данные наземных и спутниковых измерений и результаты радиационного моделирования. Пространственно-временные распределения эритемной УФР для различных территорий Земного шара представлены в ряде работ российских и зарубежных исследователей. Первые карты УФР для территории СССР были составлены в монографии «Ультрафиолетовая радиация Солнца и неба» (Белинский и др., 1968). В работе (Schallhart et al., 2008) предложен метод для построения карт УФР у поверхности Земли в реальном времени для территории Австрии с использованием данных наземных и спутниковых измерений. Карты эритемной УФР для каждого месяца были созданы для территории Словакии (Pribullova and Chmelik, 2008). Для территории Новой Зеландии был создан атлас различных видов биологически активной УФР, доступный на сайте <http://www.niwa.co.nz/>. В рамках реализации международного проекта COST726 был разработан электронный атлас суточных доз эритемной УФР для территории Европы с разрешением по пространству  $1^\circ$  на  $1^\circ$  для периода 1958-2002 гг. (Litynska et al., 2012). Кроме того, для территории Европы был разработан атлас годовых доз эритемной УФР (Slaper et al., 2001) на основе данных радиационного моделирования с учетом изменений высоты Солнца и общего содержания озона по данным спутникового радиометра TOMS.

Однако небольшие дозы УФР оказывают положительное влияние на здоровье человека. В 2006 году Международной комиссией по освещению был принят спектр действия образования витамина D под действием УФР (CIE,

2006). Используя принятый спектр действия, были получены оценки влияния УФР на образование витамина D в различных географических районах, например, (Fioletov et al., 2009, 2010; Kazantzidis et al., 2009; Engelsen et al., 2005; Webb and Engelsen, 2006; Krzyscin et al., 2011).

К недостаткам существующих исследований можно отнести отсутствие комплексной оценки влияния УФР на здоровье человека одновременно с точки зрения образования витамина D и эритемы на всей территории Северной Евразии ( $40.5^{\circ}$  -  $80.5^{\circ}$  с.ш.,  $25.5^{\circ}$  з.д. -  $180^{\circ}$  в.д.). Выбор территории Северной Евразии, а не только территории России, для исследования объясняется несколькими причинами: 1) необходимостью изучения УФР на территории Азии в связи с редкостью наземной сети измерений, 2) наличием многочисленных работ, касающихся различных аспектов исследования УФР в Европе, которые позволяют верифицировать получаемые результаты. Кроме того, Северная Евразия является территорией исследования для современного междисциплинарного проекта Пан-Евразийского Эксперимента (РЕЕХ), нацеленного на изучение взаимосвязей между биосферой, океаном, криосферой и климатом (Lappalainen et al., 2014).

Таким образом, изучение пространственно-временного распределения биологически активной УФР (БАУФР), оказывающей влияние на здоровье человека, на территории Северной Евразии является актуальной задачей. В диссертационной работе для комплексной оценки воздействия УФР на здоровье человека вводится понятие «УФ-ресурсы».

**Объектом исследования** является биологически активная УФР.

**Предметом исследования** является пространственно-временное распределение УФ-ресурсов на территории Северной Евразии.

**Целью работы** является разработка метода оценки УФ-ресурсов и определение особенностей их пространственно-временного распределения на территории Северной Евразии.

В связи с этим были поставлены следующие **задачи**:

- Провести оценку чувствительности двух видов БАУФР (эритемной УФР и УФР, способствующей образованию витамина D) к изменению основных геофизических факторов.
- Создать для дальнейшего моделирования УФР базу данных наиболее важных геофизических параметров, определяющих поступление УФР к по-

верхности Земли, и выявить особенности их распределения на территории Северной Евразии.

- Разработать метод оценки и классификацию УФ-ресурсов.
- Оценить УФ-ресурсы в московских условиях по данным измерений Метеорологической обсерватории МГУ (МО МГУ).
- Оценить распределение УФ-ресурсов в ясных и средних облачных условиях на территории Северной Евразии.
- Создать интерактивную программу для определения УФ-ресурсов на территории Северной Евразии.

### **Научная новизна**

- Впервые получены оценки чувствительности двух видов БАУФР к изменению основных геофизических факторов на основании модельных расчетов и измерений Метеорологической обсерватории МГУ.
- Предложен метод оценки облачного пропускания в УФ-диапазоне спектра по данным спутниковых измерений и реанализа, который позволил уточнить распределение облачного пропускания в УФ-диапазоне спектра на территории Северной Евразии в условиях снежного покрова.
- Впервые составлена комплексная база данных основных геофизических параметров (общее содержание озона, аэрозольная оптическая толщина на длине волны 380 нм, альbedo поверхности, облачное пропускание), влияющих на УФР, для территории Северной Евразии с временным разрешением 1 месяц и пространственным разрешением 1 градус.
- Разработан новый метод оценки УФ-ресурсов.
- Впервые по предлагаемому методу и по уточненным данным многолетних измерений Метеорологической обсерватории МГУ оценены УФ-ресурсы в Московском регионе.
- Впервые на основании надежных баз геофизических данных определено пространственно-временное распределение УФ-ресурсов для разных типов кожи на территории Северной Евразии.

### **Практическая значимость работы**

- Полученные результаты, а также интерактивная программа для определения доз эритемной УФР и УФ-ресурсов (<http://momsu.ru/uv/>), могут быть использованы для оповещения населения об уровне УФ-недостаточности и УФ-избыточности и составления рекомендаций по режиму УФ-облучения и гелиотерапии.
- По результатам работы проведено уточнение архива данных многолетних измерений эритемной УФР, проводимых в МО МГУ.
- Полученные оценки пространственно-временного распределения БАУФР могут быть использованы в эпидемиологических исследованиях, для оценки накопленных доз УФР за длительный период времени, которые могут приводить к развитию заболеваний.

### **Личный вклад автора**

Все анализируемые результаты работы получены автором лично или в соавторстве с доктором географических наук Натальей Евгеньевной Чубаровой. Ведущая роль в постановке задачи, а также идея метода определения УФ-ресурсов принадлежит Н.Е. Чубаровой. Личный вклад автора состоит в самостоятельном проведении всех необходимых расчетов, анализе использованных данных, а также в интерпретации полученных результатов. Необходимые расчетные программы, используемые на всех этапах исследования, созданы автором. Кроме того, автором была разработана интерактивная программа для оценки УФ-ресурсов на территории Северной Евразии. Автор принимал непосредственное участие в написании научных статей по теме диссертации и в представлении научных докладов, в том числе в качестве докладчика.

### **Положения, выносимые на защиту**

- Метод определения и классификация УФ-ресурсов.
- Пространственно-временное распределение УФ-ресурсов на территории Северной Евразии в ясных и средних облачных условиях.
- Особенности чувствительности эритемной УФР и УФР, способствующей образованию витамина D, к основным геофизическим факторам (высота Солнца, общее содержание озона, аэрозольная и облачная оптическая толщина, альbedo поверхности).

- Метод оценки облачного пропускания УФР на основе спутниковых данных по отражательной способности на длине волны 380 нм, данных о балле нижней облачности реанализа и альбедо поверхности.

### **Апробация работы**

Основные результаты работы получены с использованием точных радиационных расчетов. Верификация расчетов осуществлялась по многолетним измерениям в МО МГУ и литературным данным.

По результатам диссертационного исследования опубликовано **33 работы**, в том числе 6 статей в журналах, 21 тезисов докладов конференций, 2 тезисов в рецензируемых трудах международных конференций. **Четыре статьи** опубликованы в научных журналах и изданиях, которые включены в перечень российских рецензируемых научных журналов и изданий для опубликования основных научных результатов диссертации. Для интерактивной программы оценки УФ-ресурсов на территории Евразии получено свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №2015660523, 1 октября 2015г.

Основные результаты исследования опубликованы в высокорейтинговом журнале *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology* (IF 2.803). Результаты исследования нашли отражение в ежегодных электронных изданиях "Эколого-климатические характеристики атмосферы в 2012 (2013, 2014) г. по данным Метеорологической обсерватории МГУ".

Результаты работы были представлены на отечественных и зарубежных конференциях: на Международном симпозиуме «Атмосферная радиация и динамика» в 2011, 2013, 2015 гг., Санкт-Петербург; Рабочей группе «Аэрозоли Сибири» в 2010, 2013 гг, г.Томск; Молодежной научной школе «Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические эффекты (САТЭП)» в 2012г., г.Звенигород и в 2015 г., пос. Шепси; Международном молодежном научном форуме «ЛОМОНОСОВ-2010» и «ЛОМОНОСОВ-2013», г.Москва; «International Radiation Symposium» в 2012г., Берлин, Германия, «EGU General Assembly», Vienna, Austria в 2014 г., Вена, Австрия, «IGU Regional Conference», в 2015г., Москва.

### **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, списка иллюстраций, списка таблиц и приложения. Общий объем работы - 208 страниц, включая 77 рисунков и 20 таблиц. Список литературы

содержит 161 наименование, в том числе 129 на английском языке.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследования, показана научная новизна, практическая значимость работы и личный вклад автора, представлены основные положения, выносимые на защиту; приводятся сведения об апробации работы.

**Глава 1** посвящена ряду актуальных вопросов изучения биологически активной ультрафиолетовой радиации. В **разделе 1.1** приведены оценки влияния основных геофизических факторов на поступление УФР к поверхности Земли по данным литературных источников. **Раздел 1.2** содержит обзор работ, посвященных исследованию влияния БАУФР на здоровье человека, проявляющегося через образование эритемы и витамина D. В **разделе 1.3** собрана информация об основных методах изучения УФР: наземных, спутниковых измерениях, моделировании, отдельный подраздел посвящен оценкам пространственно-временного распределения УФР в разных регионах Земного шара. В **разделе 1.4** представлены выводы к главе.

В **главе 2** описаны использованные материалы и методы исследования. Основным инструментом, с помощью которого были получены главные результаты работы, является модифицированная модель радиационного переноса TUV (Tropospheric and ultraviolet model) (Madronich, Flocke, 1998; Чубарова, 2006). В программном блоке для решения уравнения переноса радиации реализован псевдосферический восьмипотоковый метод дискретных ординат DISORT (Stammes et al., 1988). Погрешность расчета солнечного излучения с помощью этого метода не превышает 1%. Вертикальное разрешение модели составляло 1 км и включало 80 слоев, спектральное разрешение - 1 нм. Вертикальное распределение озона задавалось с учетом особенностей вертикального профиля согласно (WMO, 1986). Расчет оптических толщин озона проводился с учетом температурной зависимости значений коэффициента поглощения. В модели учитывается ослабление радиации аэрозолем и протяженной облачностью. Профиль аэрозоля задавался согласно распределению, принятому в континентальной модели атмосферы II CONT-I в слое 0-12 км (WMO, 1986). Для характеристики радиационных свойств аэрозоля использовалась аэрозольная оптическая толщина (АОТ) для длины волны ( $\lambda$ ) 380 нм.



Важные аэрозольные характеристики - фактор асимметрии индикатрисы рассеяния и альbedo однократного рассеяния (SSA) задавались постоянными климатическими значениями согласно оценкам этих параметров, полученным по данным измерений сети AERONET в Европе (Chubarova, 2009).

Для оценки пространственно-временного распределения основных геофизических параметров, влияющих на поступление БАУФР к поверхности Земли, на основании рядов наблюдений (Табл. 1) была создана база данных с пространственным разрешением 1 градус и временным разрешением 1 месяц. Для оценки временного и пространственного распределения общего содержания озона (СО) использовались измерения спутникового радиометра TOMS за период 1979-2003г., которые считаются наиболее надежными. Для оценки распределения АОТ на длине волны 380 нм использовались данные спектрометрического радиометра MODIS (коллекция 5), данные сети AERONET и российской актинометрической сети (Чубарова, Жданова, 2012). Для учета спектральной зависимости АОТ были применены данные по параметру Ангстрема, доступные из фотометрических измерений сети AERONET.

Таблица 1 – Первичные наземные и спутниковые данные об основных параметрах, влияющих на УФР

Параметр	Данные, (временной период, годы)
Общее содержание озона	TOMS (1979-2003)
Аэрозольная оптическая толщина	
на длине волны 380 нм	MODIS (2000-2008), AERONET (1994-2006), Российская актинометрическая сеть (1980-2003)
Альbedo поверхности	MTW TOMS LER (1979-1992), (Tanskanen and Manninen, 2007)
Отражательная способность	
поверхности	
на длине волны 380 нм	TOMS (1979-2002)
Балл нижней облачности	реанализ ECMWF ERA-Interim (1979-2002)

Для оценки альbedo поверхности в УФ-диапазоне спектра были использованы ежедневные спутниковые данные (Tanskanen and Manninen, 2007). Оценки облачного пропускания УФР по предлагаемому в работе методу были проведены по данным об отражательной способности на длине волны 380 нм, измеренной спутниковым прибором TOMS, и данным по баллу нижней облачности реанализа ECMWF ERA-Interim.

В работе использованы данные многолетних непрерывных измерений УФР в МО МГУ. Измерения эритемной УФР в МО МГУ проводятся с 1999 го-

да широкополосными пиранометрами UVB-1 YES (до 2013 года) и UV-S-E-T KIPP&Zonen (с 2013 года). Приборы имеют кривые спектральной чувствительности близкие к эритемной кривой действия (CIE, 1998). Нами был создан архив измерений эритемной радиации версии 3, в котором содержатся наиболее точные данные с учетом рекомендованных Всемирной метеорологической организацией поправок, а также с учетом температурной поправки, которая была применена к измерениям прибора UVB-1 YES. Автором было получено эмпирическое выражение для расчета скорректированной величины эритемной УФР в зависимости от температуры прибора, которая связана с температурой воздуха для пиранометра UVB-1 YES. На рис.1 показаны среднемесячные суммы эритемной УФР за период 1999-2012 гг. в соответствии с архивом версии 2 (без учета температурной поправки) и новым архивом версии 3 (с учетом температурной поправки). Видно, что занижение данных измерений прибором UVB-1 YES без учета температурной коррекции в зимний период года составляло до 20-30%.

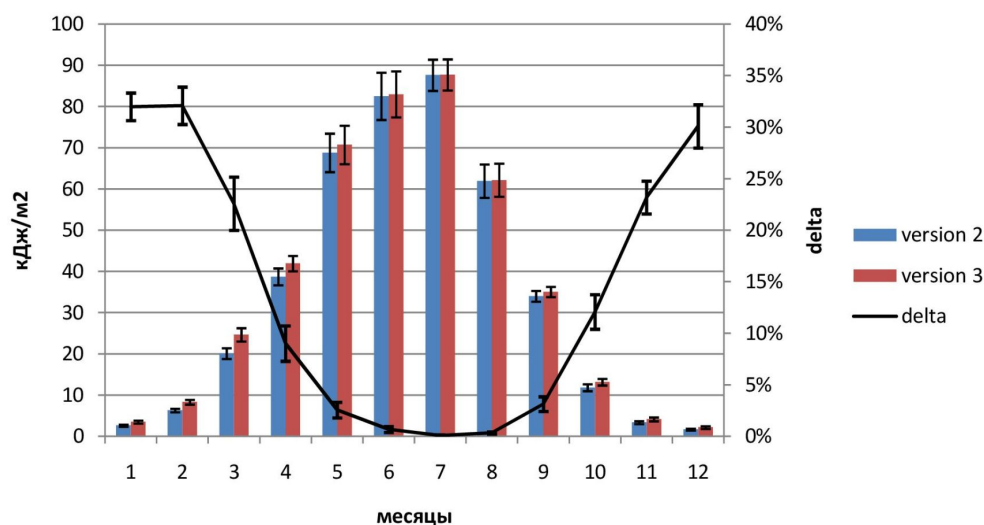


Рисунок 1 — Среднемесячные суммы эритемной УФР в Москве в соответствии с архивом версии 2 и версии 3 с 95% доверительными интервалами (левая ось). Delta – относительная разница между данными архива версии 3 и версии 2 (правая ось) 1999-2012 гг.

Дополнительно в исследовании использовались аэрозольные измерения фотометра CIMEL в рамках программы AERONET, и ряд наблюдений стандартных метеорологических параметров: балл общей и нижней облачности, доля снежного покрова, температура воздуха, скорость ветра, проведенных в МО МГУ.

В **главе 3** проведен сравнительный анализ чувствительности двух видов БАУФР - эритемной УФР и УФР, способствующей образованию витамина D, к основным геофизическим факторам: высоте Солнца, общему содержанию озона, аэрозольной и облачной оптической толщине, альбедо поверхности.

Биологически активная ультрафиолетовая радиация рассчитывается:

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

где  $\lambda$  - длина волны в нм,  $Q_{\lambda}$  - спектральная плотность потока излучения,  $E_{\lambda}$  - спектр биологического действия.

Для удобства и с целью широкого оповещения населения об уровне УФР, опасным с точки зрения образования эритемы, используется понятие УФ-индекс (WHO, 2002). УФ-индекс определяется, как  $UVI = Q_{ery}/0.025$ , где  $Q_{ery}$  – эритемная УФР, выраженная в Вт/м<sup>2</sup>.

Поскольку рассматриваемые кривые биологического действия имеют разную спектральную эффективность, в **разделе 3.1** проведена оценка чувствительности двух видов БАУФР к изменению основных геофизических факторов. В качестве основного метода оценки использован радиационный фактор усиления ( $RAF$ ) (Booth, Madronich, 1994). В общем виде выражение для характеристики чувствительности УФР с использованием  $RAF$  к разным геофизическим параметрам можно представить в виде:

$$Q \sim P^{-RAF_p}, \quad (2)$$

где  $Q$  – плотность потока излучения,  $P$  - рассматриваемый атмосферный параметр (общее содержание озона, аэрозольная и облачная оптические толщины, альбедо поверхности).

Для объяснения полученных спектральных различий во влиянии факторов были рассчитаны эффективные длины волн. В **разделе 3.1** выявлено, что изменения высоты Солнца и общего содержания озона определяют наибольшие различия между изменениями  $Q_{ery}$  и  $Q_{vitD}$ . Радиационный фактор усиления за счет высоты Солнца для  $Q_{ery}$  изменяется от 1.9 до 2.1, для  $Q_{vitD}$  от 2.4 до 2.7. Радиационный фактор усиления за счет общего содержания озона для  $Q_{ery}$  изменяется от -0.8 до -1.2, для  $Q_{vitD}$  от -1.4 до -2.3. Показано, что  $Q_{ery}$  и

$Q_{vitD}$  также имеют разный характер чувствительности к общему содержанию озона в зависимости от высоты Солнца. Различный характер чувствительности  $Q_{ery}$  и  $Q_{vitD}$  к изменению общего содержания озона и высоты Солнца объясняется, главным образом, изменениями эффективной длины волны излучения. Модельные оценки радиационного фактора усиления за счет аэрозольной и облачной оптических толщин незначительно различаются для  $Q_{ery}$  и  $Q_{vitD}$ . Модельные оценки чувствительности  $Q_{ery}$  к изменению общего содержания озона и характеристик аэрозоля согласуются с экспериментальными данными МО МГУ.

В разделе 3.2 оценена относительная изменчивость двух видов БАУФР за счет изменений основных геофизических параметров. В действительном диапазоне изменчивости геофизических параметров, влияющих на УФР, большие относительные изменения БАУФР наблюдаются за счет общего содержания озона (для  $Q_{vitD}$  превышает 200%, для  $Q_{ery}$  - 100%). Ослабление БАУФР закономерно увеличивается с ростом АОТ и с уменьшением SSA. Высокое альbedo чистой снежной поверхности (95%) увеличивает  $Q_{ery}$  и  $Q_{vitD}$  за счет многократного переотражения в безоблачных условиях на 54% и 57% , соответственно. В зимних городских условиях альbedo поверхности (40%) увеличивает  $Q_{ery}$  и  $Q_{vitD}$  на 17% и 18%, соответственно, в безоблачных условиях. Ослабление БАУФР плотной облачностью в условиях отсутствия переотражения радиации от поверхности Земли может достигать 85%, однако, в условиях высокого альbedo поверхности (95%) и при облачности ( $\tau = 30$ ) может наблюдаться относительный рост БАУФР (до 5-9%). В разделе 3.3 представлены выводы к главе 3.

В разделах 4.1 - 4.3 Главы 4 проведена оценка на основании созданной базы данных особенностей пространственно-временного распределения основных геофизических факторов (общего содержания озона, АОТ на длине волны 380 нм и альbedo поверхности), влияющих на УФР, и полуденных УФ-индексов на территории Северной Евразии.

Таблица 2 — Значения радиационных факторов усиления  $RAF_p$  эритемной радиации и радиации, способствующей образованию витамина D, для наиболее значимых параметров: высоты Солнца ( $RAF_h$ ), общего содержания озона ( $RAF_X$ ), аэрозольной оптической толщины ( $RAF_{AOT}$ ), оптической толщины облаков ( $RAF_\tau$ ), альbedo поверхности ( $RAF_A$ ).

$RAF_p$ , (диапазон)*	Параметры расчета**	R2	$Q_{ery}$ (Эффективные длины волн***)	$Q_{vitD}$ (Эффективные длины волн***)
$RAF_h$ , (10-60°)	X=250, AOT=0-1, $\tau=0-70$ , A=0.1-0.9	0.99	2...2.1 (329-313 нм)	2.4...2.5 (311-307 нм)
	X=450, AOT=0-1, $\tau=0-70$ , A=0.1-0.9	0.99	1.9 (339-320нм)	2.6...2.7 (314-309 нм)
$RAF_X$ , (250-450 DU)	h=10°, AOT=0-1, $\tau=0-70$ , A=0.1-0.9	0.99	-0.8 (329-339 нм)	-2.2...-2.3 (311-314 нм)
	h=60°, AOT380=0-1, $\tau=0-70$ , A=0.1-0.9	0.99	-1.2 (313- 320нм)	-1.4...-1.6 (307-309 нм)
$RAF_{AOT}$ , (0.1 - 1)	h=10-60°, X=250-450, $\tau=0-70$ , A=0.1-0.9	0.88-0.91	-0.05...-0.3 (325-325 нм)	-0.05...-0.3 (310-310 нм)
$RAF_A$ , (0.1-0.5)	h=10-60°, AOT=0-1, X=250-450, $\tau=0-70$	0.91-0.94	0.1...0.2 (325-324нм)	0.1...0.2 (310-310нм)
$RAF_\tau$ , (10 -70)	h=10-60°, AOT=0-1, X=250-450, A=0.1-0.9	0.96-0.99	-0.3...-0.7 (325-324нм)	-0.3...-0.7 (310-310нм)

Примечание \* - Отметим, что не для всех параметров применима степенная зависимость, позволяющая применять данный подход, поэтому для основных параметров иногда рассматриваются более узкие диапазоны, где коэффициенты детерминации высоки.

\*\* -  $X$ -общее содержание озона,  $\text{матм.см}$ , АОТ- аэрозольная оптическая толщина,  $\tau$  – облачная оптическая толщина,  $h$ - высота Солнца,  $A$ - альbedo поверхности. \*\*\* - Эффективные длины волны рассчитывались для минимальных и максимальных значений исследуемого параметра (значения приведены в скобках), приведенного в столбце 1.

В разделе 4.4 представлен метод оценки облачного пропускания УФР. Было выявлено, что использование стандартного алгоритма (Eck et. al., 1995) приводит к существенному занижению оценок облачного пропускания УФР в условиях подстилающей поверхности с высоким альbedo. Предлагаемый метод определения облачного пропускания УФР использует данные по отражательной способности на длине волны 380 нм спутникового радиометра TOMS ( $R_{380}$ ) с привлечением дополнительной информации по баллу нижней облачности и альbedo поверхности. Метод основан на приближении независимых пикселей. Отражательная способность на длине волны 380 нм состоит из двух частей: ясной (отражательная способность поверхности) и облачной (отражательная способность облаков), взятых с весовыми коэффициентами, определяемых по баллу нижней облачности как наиболее оптически плотной и вызывающей наибольшие потери УФР:

$$CQ = 1 - (R_{380} - (1 - Nn) * A_s), \quad (3)$$

где  $CQ$  - облачное пропускание,  $R_{380}$  - отражательной способности на длине волны 380 нм,  $A_s$  - альbedo поверхности,  $Nn$  - балл нижней облачности

Тестирование предлагаемого метода было выполнено по данным измерений УФР в диапазоне длин волн 300-380 нм и эритемной УФР, проведенных в МО МГУ (рис.2). Облачное пропускание УФР было рассчитано, как  $CQ = Q/Q_0$ , где  $Q$  - УФР в действительных условиях облачности,  $Q_0$  - УФР в безоблачных условиях. Величины  $CQ$  по данным измерений были получены по месячным суммам радиации. Знаменатель в экспериментальных оценках  $CQ$  был получен двумя способами: с использованием измерений радиации в ясные сроки (обозначение "meas") и с помощью модельных расчетов при безоблачном небе и учете действительных значений аэрозольной оптической толщины и альbedo поверхности по (Tanskanen,2004) (обозначение "model"). Для значений  $CQ$ , полученных по данным измерений, показаны 95%-ые до-

верительные интервалы. Черной кривой на рис. 2 показаны оценки  $CQ$ , полученные по стандартному спутниковому алгоритму восстановления облачного пропускания (Eck et al., 1995). Оценки  $CQ$  по предлагаемому методу находятся в пределах доверительных интервалов для значений облачного пропускания, полученных по данным измерений во все месяцы года за исключением января, что может быть связано с малой выборкой измерений для этого месяца года в московских условиях.

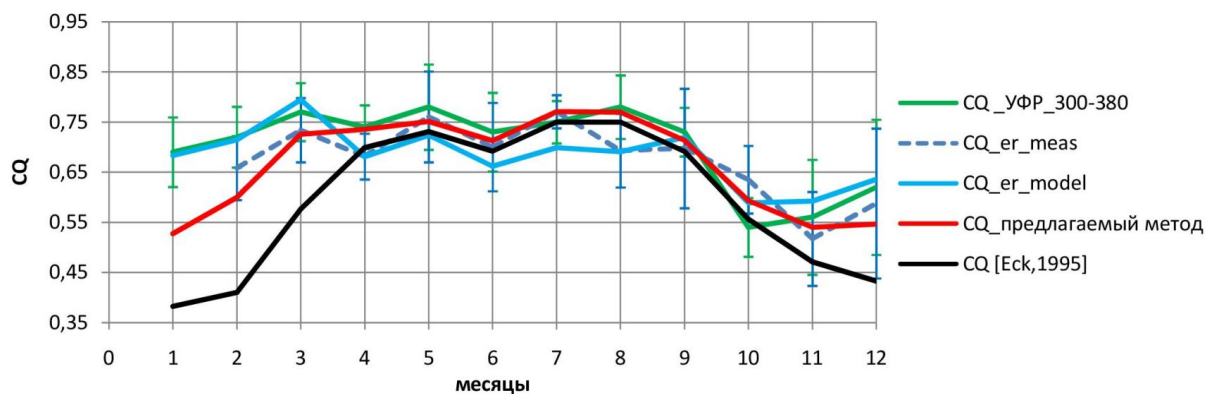


Рисунок 2 — Среднемесячные значения облачного пропускания ( $CQ$ ) для московских условий, определенные различными методами:  $CQ_{300-380}$  - по данным измерений УФР 300-380,  $CQ_{er_{meas}}$  - по данным измерений эритемной УФР,  $CQ_{er_{model}}$  - с привлечением модельных расчетов радиации при безоблачном небе. Для оценок  $CQ$ , полученным по данным измерений, приведены 95%-ые доверительные интервалы.

В разделе 4.4 представлено и сопоставлено с особенностями атмосферной циркуляции облачное пропускание УФР на территории Северной Евразии, рассчитанное по предложенному методу.

Поскольку расчеты БАУФР требуют больших машинных ресурсов, то были созданы электронные таблицы модельных значений БАУФР с помощью программного комплекса TUV для широкого набора параметров, а затем, используя метод линейной интерполяции, проведены оценки доз УФР в действительных условиях. Электронные таблицы расчетных значений БАУФР были созданы с разрешением  $1^\circ$  градус по высоте Солнца в диапазоне от  $1^\circ$  до  $90^\circ$ , с разрешением 0.02 по АОТ380 в диапазоне от 0 до 0.99, с разрешением 20 ед. Добсона по общему содержанию озона в диапазоне от 150 до 490 ед. Добсона, и с разрешением 10% по альбедо поверхности в диапазоне 0-100%. Анализ погрешности интерполяции показал, что она не превышает 1%. Использо-

ние электронных таблиц позволило эффективно проводить расчеты БАУФР с разным временным осреднением: от мгновенных значений до суточных доз с шагом в 3 минуты. Основные вычисления были выполнены с помощью суперкомпьютера МГУ «Чебышев».

В разделе 4.5 получены оценки среднемесячных полуденных значений УФ-индексов на территории Северной Евразии в ясных и средних облачных условиях. Показано, что пространственное распределение УФ-индексов имеет субширотный характер, а отклонение от него обусловлено изменениями общего содержания озона, содержания аэрозоля, альbedo поверхности и облачности. УФ-индексы, превышающие значение, равное 3, при котором людям со вторым типом кожи необходима защита от Солнца, на рассматриваемой территории наблюдаются с марта по октябрь. В разделе 4.6 представлены выводы к главе 4.

Глава 5 посвящена определению УФ-ресурсов на территории Северной Евразии. На сегодняшний день, согласно литературным данным, не выработано единого подхода к определению пороговой дозы радиации, способствующей образованию оптимального количества витамина D. Важным параметром, который нужно учитывать при расчете порогового значения УФР, необходимого для образования витамина D, является степень открытости тела человека (McKenzie et al, 2009). Известно, что при облучении одной минимальной эритемной дозой (MED), то есть такой дозой эритемной УФР, которая приводит к первичному покраснению незагорелой кожи в течение 12-24 часов с момента облучения всего тела, человек получает  $W=10000-25000$  МЕ витамина D (МЕ – международные единицы). Уровень витамина D, необходимый человеку ежедневно, составляет от 400-600 МЕ (CIE,2006) до 1000 МЕ (CIE,2014).

Важную роль при определении УФ-ресурсов играет разная чувствительность кожи человека к эритемной УФР. Ее можно охарактеризовать с помощью классификации Фитцпатрика (Fitzpatrick,1988), в основу которой положено понятие минимальной эритемной дозы. В классификации в соответствии с MED выделяется 6 типов кожи, различающихся по степени пигментации (1-ый - самый светлый, 6-ой - самый темный).

В разделе 5.1 представлен метод определения УФ-ресурсов. Если принять, что  $W=10000$  МЕ, а необходимый уровень витамина D равен 600 МЕ, то величина порога радиации  $P(i)$  для образования витамина D ( $\text{Дж}/\text{м}^2$ ) с учетом



типа кожи ( $i$ ) и степени открытости человеческого тела  $S$  (в долях единицы) может быть рассчитана как:

$$P_i = MED_i(600/10000)/S \quad (4)$$

Подчеркнем, что в работе для определения порогового значения радиации для образования витамина D не учитывается спектр действия витамина D (CIE, 2006), поскольку существуют значительные неопределенности в его достоверности (Norval, 2010), а используется соотношение между MED и эффективностью образования витамина D согласно медицинским рекомендациям (CIE, 2006).

Для учета степени открытости тела человека было получено соотношение между этой характеристикой и эффективной температурой воздуха ( $T_{eff}$ ):  $S = 0.141 \exp(0.0041 T_{eff})$ . Эффективная температура воздуха определялась с поправкой на скорость ветра ( $V$ ):  $T_{eff} = T + (4.2719V^{-0.229} - 10)$  Данные по  $T$  и  $V$  для Северной Евразии были выбраны из архива Университета Восточной Англии, созданного по данным стационарных измерений.

По рассчитанным эффективным температурам и степени открытости человеческого тела  $S$  были получены пороги радиации, необходимые для образования витамина D для различных типов кожи в узлах сетки  $1 \times 1^\circ$ . В качестве примера на рис.3 для февраля приведены результаты расчетов  $T_{eff}$ ,  $S$  и пороговых значений радиации для образования витамина D на территории Евразии для 2-ого и 4-ого типов кожи. Видно, что величина порога радиации для образования витамина D в зимний период имеет субмеридиональное распределение с минимумом в области минимальных значений  $T_{eff}$ , который наблюдается на северо-востоке Евразии, где величина  $P$  для 2-ого типа кожи превышает  $850-900 \text{ Дж/м}^2$ . Для более смуглого 4-ого типа кожи пороговые дозы радиации резко увеличиваются (до  $1500 \text{ Дж/м}^2$  на северо-востоке).

Для определения категорий УФ-ресурсов использовалось соотношение между рассчитанной дозой эритемной УФР и пороговыми значениями радиации для образования витамина D и эритемы. Разработана классификация УФ-ресурсов. В зависимости от того, достигаются или нет пороговые дозы УФР в течение часа в околополуденное время или в течение суток предложено определять два типа УФ-недостаточности.

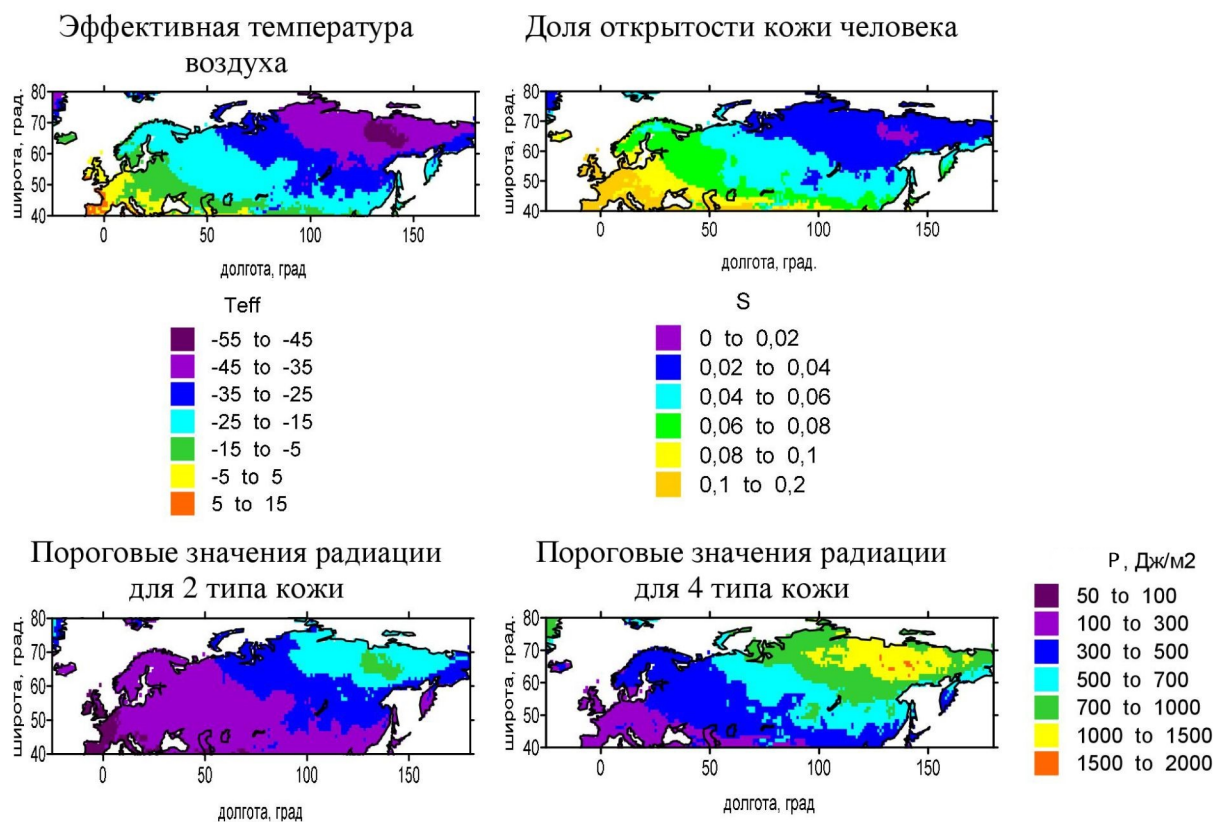


Рисунок 3 — Эффективная температура воздуха, доля открытости тела человека, пороговые значения радиации для образования витамина D для 2-ого и 4-ого типов кожи, февраль.

Если в течение суток невозможно получить пороговую дозу УФР, необходимую для образования витамина D, то такие условия определяются как условия **100% УФ-недостаточности**. Условия **полуденной УФ-недостаточности** определяются как условия, при которых невозможно получить такую дозу в течение часа около полудня, но можно в течение суток. **УФ-оптимум** определяется условиями, когда в околополуденное время в течение часа уже возможно получить дозу УФР для формирования витамина D, но величина эритемной УФР не превосходит MED для соответствующего типа кожи. Класс УФ-избыточности подразделяется на несколько подклассов в соответствии с международной классификацией УФ-индексов (UVI). В подклассе **УФ-избыточности средней степени** в околополуденное время доза эритемной УФР соответствует средней категории УФ-индексов по международной классификации (UVI=3-5 для человека со вторым типом кожи). В подклассе **УФ-избыточности высокой степени** в околополуденное время доза эритемной УФР соответствует высокой категории УФ-индексов (UVI=6-7 для человека со вто-

рым типом кожи), когда в течение часа можно получить примерно 2-3 MED. Подкласс **УФ-избыточности очень высокой степени** соответствует очень высокой категории УФ-индексов ( $UVI=8-10$  для человека со вторым типом кожи). Подкласс **УФ-избыточности экстремально высокой степени** соответствует экстремально высоким значениям УФ-индексов ( $UVI=11-15$ ). Соответственные пороговые значения эритемной УФР для разных типов кожи в значениях УФ-индексов пересчитываются с учетом соотношения MED.

В разделе 5.2 оценены УФ-ресурсы в Московском регионе. Непрерывные многолетние измерения УФР (1999-2013 гг.) в МО МГУ позволили выявить ее сезонную изменчивость за счет различных геофизических параметров. За исключением астрономического фактора, который, главным образом, контролирует сезонный ход  $Q_{ery}$ , основными факторами, влияющими на  $Q_{ery}$ , являются общее содержание озона и облачность. В течение года в среднем ослабление  $Q_{ery}$  за счет поглощения озоном изменяется от 18 до 44% с максимумом в феврале-марте, который связан с весенним максимумом общего содержания озона. Ослабление за счет облачности варьирует от 17 до 48% с максимумом в октябре-декабре вследствие усиления циклонической деятельности, ослабление за счет атмосферного аэрозоля - от 4 до 10% с максимумами в апреле и августе, которые обусловлены увеличением аэрозоля в воздухе после схода снежного покрова, а также с накоплением континентального аэрозоля и развитием лесных пожаров.

Анализ статистических параметров суточных и часовых доз  $Q_{ery}$  позволил выявить различия в режиме УФ-облучения в разные месяцы года. Как для суточных, так и часовых доз  $Q_{ery}$ , наибольшее среднее наблюдается в июле, а наибольшая дисперсия - в июне.

По данным измерений оценены ежедневные УФ-ресурсы в Москве за период 1999-2013 гг. для людей с различными типами кожи. Выявлено, что условия УФ-недостаточности создаются для всех типов кожи в течение всех дней с ноября по февраль. Высокая повторяемость условий УФ-оптимума для 2-ого типа кожи наблюдается в марте и апреле (49% и 47%), для более смуглого 4-ого типа кожи в апреле и мае, сентябре и октябре (84% и 77%, по 80%). Высокая повторяемость УФ-избыточности для 2-ого типа кожи отмечается с мая по август, для 4-ого типа кожи - с июня по июль.

В разделах 5.3 и 5.4 представлено распределение УФ-ресурсов на терри-

тории Северной Евразии в ясных и средних облачных условиях. Для каждого месяца года были рассчитаны часовые и суточные дозы эритемной УФР. Полученные дозы эритемной УФР для каждой точки сравнивались с пороговыми значениями радиации для образования эритемы и витамина D, которые зависят от типа кожи и степени ее открытости (рис. 4).



Рисунок 4 — Схема определения УФ-ресурсов

На картах (рис.5) в качестве примера представлены УФ-ресурсы для центральных месяцев года в средних облачных условиях для людей со 2-ым типом кожи, характерным для населения европейской территории России.

В январе для 2-ого типа кожи 66% узлов одноградусной сетки на территории Северной Евразии занято областью 100-% УФ-недостаточности, а 32% - полуденной УФ-недостаточности. Граница области полуденной УФ-недостаточности расположена южнее на территории Азии (около 45 с.ш.), чем на европейской территории (около 55с.ш. в районе Великобритании), что связано, во-первых, с более низкими температурами воздуха, а следовательно, с меньшей долей открытости тела человека, во-вторых, с большими значениями общего содержания озона в азиатском регионе, связанными с развитием Алеутского минимума давления. Условия УФ-оптимума наблюдаются только

на территории Испании и Италии, что объясняется большим приходом радиации в низких широтах, большими значениями облачного пропускания в этих районах. В апреле УФ-недостаточность занимает 37% узлов сетки для 2-ого типа кожи, условия УФ-оптимума - 27% , УФ-избыточности средней степени - 34%. Расширение области УФ-избыточности и сдвиг условий УФ-оптимума к северу в районе 50-70 в.д. связано как с меньшими значениями общего содержания озона, так и с более высоким облачным пропусканием в данном районе. В июле преобладает УФ-избыточность средней степени. В октябре условия УФ-избыточности наблюдаются лишь на южной границе рассматриваемой территории.

Для 2-ого типа кожи средние облачные условия могут привести к изменению УФ-ресурсов на 1-2 категории в выбранной точке. Для рассматриваемой территории изменение УФ-ресурсов на 2 категории за счет влияния облачности наблюдается с февраль по август, в остальные месяцы УФ-ресурсы изменяются на 1 категорию для 2-ого типа кожи и на 1 категорию во все месяцы года для 4-ого типа кожи.

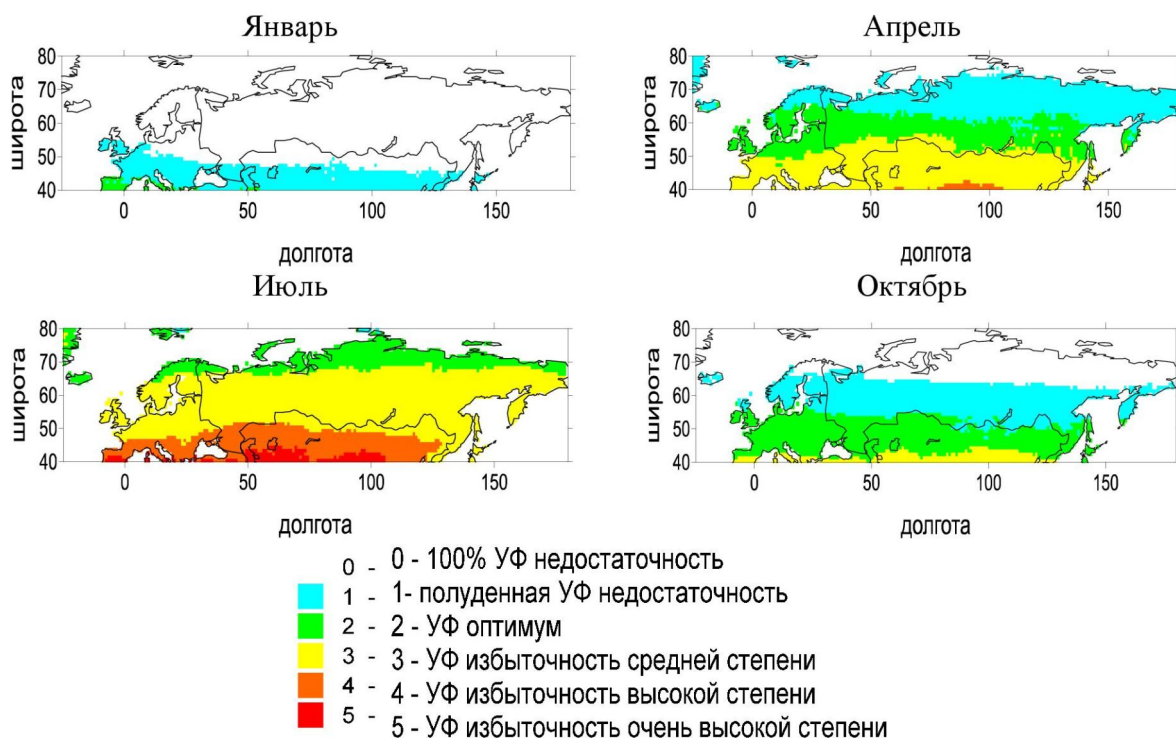


Рисунок 5 — УФ-ресурсы в средних облачных условиях для центральных месяцев года для 2-ого типа кожи.

**Раздел 5.5** посвящен оценкам распределения УФ-оптимума для различ-



ных типов кожи человека на территории Северной Евразии (рис.6). Условия УФ-оптимума могут существовать для пяти типов кожи (1-5) одновременно, но редко, например, в октябре ими занято лишь 2% узлов одноградусной сетки на рассматриваемой территории. Между тем, ситуации, когда одновременно наблюдаются условия УФ-оптимума для трех или четырех типов кожи более часты. В апреле УФ-оптимум для четырех типов кожи одновременно наблюдается в 9% узлов сетки, в основном, в Европе.

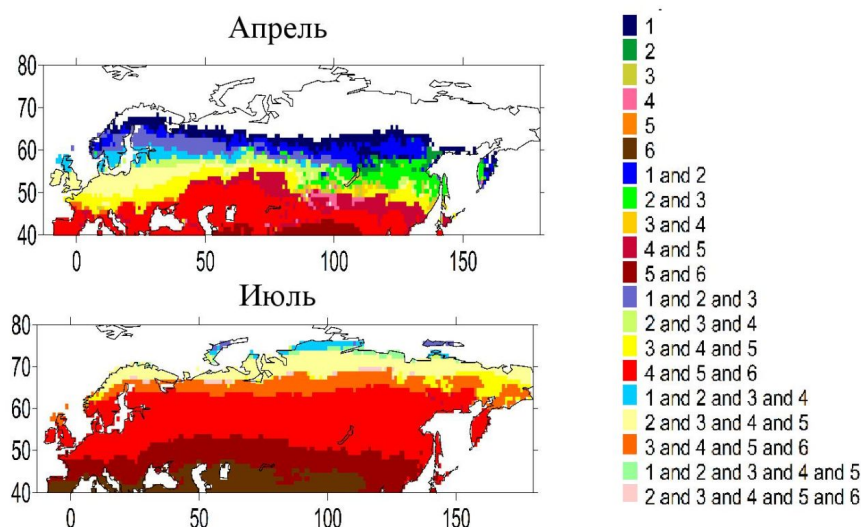


Рисунок 6 — УФ-оптимум для различных типов кожи человека.

В разделе 5.6 представлено описание интерактивной программы для определения УФ-ресурсов и расчета доз эритемной УФР на территории Северной Евразии. Программа позволяет рассчитать часовые, суточные дозы эритемной УФР в безоблачных и облачных условиях, с учетом альбедо поверхности и высоты места над уровнем моря. Удобство программы заключается в том, что возможно провести расчет средних климатических значений доз эритемной УФР и доз эритемной УФР в условиях, задаваемых пользователем, и одновременно оценить УФ-ресурсы.

Для того, чтобы определить дозу эритемной УФР в конкретной географической точке необходимо задать пространственные координаты места - широту, долготу и высоту над уровнем моря, а также временные параметры - месяц, день, час начала облучения (для расчета часовых доз радиации). Географические координаты могут быть выбраны для Северной Евразии из диапазона широт: 40.5с.ш.-79.5с.ш. и долгот: 25.5з.д.-179.5в.д., 170.5з.д.-179.5з.д. Интерактивная программа доступна по адресу <http://momsu.ru/uv/>.

В заключении сформулированы основные **выводы**:

1. Разработан метод комплексной оценки влияния УФР на здоровье человека, введено понятие УФ-ресурсы. Метод оценки УФ-ресурсов основан на сравнении доз эритемной радиации с пороговыми значениями радиации, необходимыми для образования эритемы и витамина D с учетом медицинских рекомендаций. Создана классификация УФ-ресурсов, которая состоит из трех основных классов (УФ-недостаточность, УФ-оптимум, УФ-избыточность) и нескольких подклассов. Разработанный метод учитывает, что разные типы кожи человека имеют разную чувствительность к УФР. Оценки пороговых доз УФР для образования витамина D учитывают степень открытости человеческого тела.

2. Выявлены особенности чувствительности эритемной УФР и УФР, способствующей образованию витамина D, ( $Q_{ery}$  и  $Q_{vitD}$ ), к вариациям основных геофизических факторов: высоте Солнца, общему содержанию озона, аэрозольной и облачной оптической толщине и альбедо поверхности с использованием радиационного фактора усиления. Показано, что  $Q_{ery}$  имеет меньшую чувствительность к вариациям высоты Солнца и общего содержания озона по сравнению с  $Q_{vitD}$ , что объясняется, главным образом, увеличением эффективной длины волны излучения. Показано, что  $Q_{vitD}$  и  $Q_{ery}$  имеют разный характер чувствительности к общему содержанию озона в зависимости от высоты Солнца. Модельные оценки радиационного фактора усиления за счет аэрозольной оптической толщины для  $Q_{ery}$  и  $Q_{vitD}$  различаются незначительно.

3. По данным уточненного автором архива измерений эритемной УФР в Метеорологической обсерватории МГУ за период 1999-2013 гг показано, что среднее за год ослабление  $Q_{ery}$  за счет облачности и озона приблизительно одинаковое и составляет около 30%, в то время как ослабление  $Q_{ery}$  за счет аэрозоля равно 7%. Использование нового метода оценки УФ-ресурсов выявило, что условия УФ-недостаточности создаются для всех типов кожи человека в течение всех дней с ноября по февраль. Оценки повторяемости УФ-ресурсов показали, в частности, что условия УФ-оптимума для 2-ого типа кожи наиболее часто наблюдаются в марте и апреле (49% и 47%), и сентябре и октябре (60% и 49%). В то же время для более смуглого 4-ого типа кожи повторяемость УФ-оптимума наиболее высока в апреле-мае и августе-сентябре.

4. Разработан метод оценки облачного пропускания УФР на основе спутниковых данных по отражательной способности на длине волны 380 нм, данных о балле нижней облачности реанализа ECMWF ERA-Interim и альbedo поверхности. Метод позволил существенно уточнить определение облачного пропускания УФР в условиях снежного покрова.

5. На основании анализа существующих спутниковых и наземных данных геофизических параметров были созданы базы данных по общему содержанию озона, аэрозольной оптической толщине на длине волны 380 нм, альbedo поверхности и уточненному автором облачному пропусканию УФР с разрешением по пространству  $1 \times 1^\circ$  и 1 месяц по времени для территории Северной Евразии.

6. Определены УФ-ресурсы на территории Евразии в ясных и облачных условиях для людей с разными типами кожи для всех месяцев года на основе разработанных баз геофизических данных и модельных расчетов. Показано, что для людей с разными типами кожи возникает существенно разная обеспеченность УФ-ресурсами за счет изменения высоты Солнца и основных геофизических параметров, влияющих на приход УФР к поверхности Земли, а также в зависимости от степени открытости тела человека. Показано, что условия УФ-оптимума для людей с разными типами кожи в холодный период года наблюдаются в большей степени в Европе, чем в Азии, что связано с особенностями распределения общего содержания озона и эффективной температуры воздуха. В средних облачных условиях наблюдается сдвиг категорий УФ-ресурсов на 5-10 градусов южнее по сравнению с их положением в условиях ясного неба. Также средние облачные условия в рассматриваемом пункте могут привести к изменению категории УФ-ресурсов, в частности, для 2-ого типа кожи - на 1-2 категории.

7. Метод определения УФ-ресурсов реализован в интерактивной программе, доступной по адресу <http://momsu.ru/uv/>. Оценки эритемной УФР и УФ-ресурсов могут быть получены в любой точке на территории Северной Евразии с учетом высоты места над уровнем моря для климатических условий в соответствии с разработанными базами данных геофизических параметров или в соответствии с параметрами, заданными непосредственно пользователем.



## ОСНОВНЫЕ РАБОТЫ, ОПУБЛИКОВАННЫЕ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Статьи в журналах, включенных в перечень российских рецензируемых научных журналов и изданий для опубликования основных научных результатов диссертации:**

1. **Жданова Е.**, Чубарова Н. Оценка воздействия различных атмосферных параметров на биологически активную УФ-радиацию по данным расчетов и измерений // Оптика атмосферы и океана. — 2011. — Т. 24, № 9. — С. 775–781
2. Чубарова Н., **Жданова Е.** Ультрафиолетовые ресурсы при ясном небе на территории России // Вестник Московского университета. Серия 5. География. — 2012. — № 6. — С. 9–19
3. Климатические и экологические характеристики московского мегаполиса за 60 лет по данным Метеорологической обсерватории МГУ / Чубарова Н.Е., Незваль Е.И., Беликов И.Б., Горбаренко Е.В., Еремина И.Д., **Жданова Е.Ю.**, Корнева И.А., Константинов П.И., Локощенко М.А., Скороход А.И., Шиловцева О.А. // Метеорология и гидрология. — 2014. — № 9. — С. 49–64
4. **Жданова Е.Ю.**, Чубарова Н.Е. Интерактивная интернет-программа для определения УФ-ресурсов и расчета доз эритемной УФР на территории Северной Евразии // Геофизические процессы и биосфера. — 2015. — Т. 14.— №2. — С. 81-94

### Публикации в рецензируемых журналах и сборниках:

5. Chubarova N., **Zhdanova Ye.** Ultraviolet resources over Northern Eurasia // Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology. — 2013. — Vol. 127. — P. 38–51.
6. **Zhdanova E.**, Chubarova N., Blumthaler M. Biologically active UV-radiation and UV-resources in Moscow (1999–2013) // Geography, Environment, Sustainability. — 2014. — №2. — P. 71–85.
7. **Zhdanova Y.**, Chubarova N., Nezval Y. A method of estimating cloud transmission in the uv spectral range using data from different satellite measurements and reanalysis // AIP Conf. Proc. 1531. — 2013. — P. 911–914.
8. Chubarova N., **Zhdanova Y.** The assessment of UV resources over Northern Eurasia // AIP Conf. Proc. 1531. — 2013. — P. 764–767