

Российская академия наук  
Сибирское отделение  
Учреждение Российской академии наук  
Институт солнечно-земной физики СО РАН



На правах рукописи  
УДК 551.521.17 (043)

Тащилин Михаил Анатольевич

**ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ И ВРЕМЕННЫЕ ВАРИАЦИИ  
ПОЛЕЙ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОЙ РАДИАЦИИ  
НА ТЕРРИТОРИИ СИБИРИ**

Специальность 25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы

**АВТОРЕФЕРАТ**

**12 МАЙ 2011**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Иркутск – 2011



Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук  
Институте солнечно-земной физики  
Сибирского отделения Российской академии наук

**Научный руководитель:**

доктор физико-математических наук  
Михалев Александр Васильевич

**Официальные оппоненты:**

доктор физико-математических наук, профессор  
Черемисин Александр Алексеевич

доктор технических наук, профессор  
Кудряшев Геннадий Сергеевич

**Ведущая организация:**

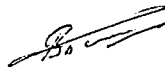
Учреждение Российской академии наук  
Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева  
Сибирского отделения Российской академии наук

Защита диссертации состоится «31» мая 2011 г. в «4» часов на заседании диссертационного совета Д 003.034.01 при Учреждении Российской академии наук Институте солнечно-земной физики СО РАН (664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 126-а, а/я 291).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Учреждения Российской академии наук Института солнечно-земной физики СО РАН

Автореферат разослан «  » \_\_\_\_\_ 2011 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
кандидат физико-математических наук



В.И. Поляков

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Излучение Солнца в диапазоне 10–250 нм ультрафиолетовой части спектра является одним из основных факторов, определяющих состояние атмосферы Земли. Поглощение ультрафиолетовой радиации (УФР) в верхней атмосфере на высотах 100–200 км обеспечивает нагрев термосферы, служит источником образования атомарного кислорода в результате фотодиссоциации молекул  $O_2$  и является основным источником образования ионосферы в результате фотонионизации термосферных составляющих  $O$ ,  $O_2$ ,  $N_2$ . В средней и нижней атмосфере атомы и молекулы кислорода в результате тройных столкновений образуют молекулы озона, которые, в свою очередь, способны эффективно поглощать часть УФР. Это особенно важно для жизнедеятельности человека, так как воздействие на него эритемной части УФР (280–400 нм) может вызвать ожог и привести к развитию рака кожи. Поэтому получение знаний о пространственно-временных изменениях УФР является актуальной геофизической задачей как в научном, так и в прикладном аспектах.

На уровень и вариации УФР, дошедшей до поверхности Земли, кроме гелиофизических факторов, связанных с угловой высотой Солнца, влияние оказывают также геофизические факторы, к которым можно отнести: общее содержание озона (СОО), вариации состава и концентрации атмосферного аэрозоля, рэлеевское рассеяние на молекулах воздуха, альbedo подстилающей поверхности, облачный покров и т. д. Вариации атмосферных параметров, являясь изменчивыми в широком временном масштабе, по-разному влияют на УФР в различных участках спектра и в разной степени модулируют приземную УФР, в результате чего в вариациях полей УФР могут возникать пространственно-временные неоднородности и особенности. Величина влияния каждого из параметров может отличаться для различных регионов планеты, поскольку всегда существуют региональные особенности состояния и динамики атмосферы.

### Актуальность проблемы исследования

Исследование вариаций приземной УФР является одной из задач в контексте проблемы изменения климата Земли. Вариации УФ-излучения могут быть связаны с наблюдаемыми в последние десятилетия климатическими изменениями некоторых атмосферных параметров, в частности с существованием отрицательных временных трендов атмосферного озона. Тенденция к уменьшению толщины озонового слоя подразумевает увеличение интенсивности приземного УФ-излучения. Однако на сегодняшний день данные мировых исследований по этому вопросу показывают, что в различных регионах планеты, которые характеризуются разными климатическими условиями, существуют свои локальные особенности вариаций приземной УФР. Существование таких физико-географических особенностей, влияющих на атмосферные параметры (СОО, облачный и аэрозольный режим атмосферы и т. п.), обуславливает необходимость проведения исследований приземной УФР во многих регионах планеты, в частности на территории Сибири, где пространственно-временные вариации УФР, их особенности и тенденции изучены недостаточно.

### **Цель работы и направленность исследований**

Целью данной работы является исследование особенностей пространственного распределения полей приземной УФР, межсуточных, межгодовых вариаций УФР на территории Сибири, исследование зависимости приземной УФР от солнечной активности. На основании вышеизложенного научная проблема диссертационного исследования определяется следующим образом: определение пространственно-временных особенностей полей приземной УФР в Сибирском регионе. В связи с этим решались **следующие основные задачи:**

- Разработка и реализация специализированного программного комплекса для работы со спутниковыми данными прибора TOMS (спутники «Nimbus-7», «Meteor» и «Earth Probe»);
- Сопоставление спутниковых данных TOMS и данных наземных измерений прямой УФР для г. Иркутска;
- Определение характеристик межсуточных, сезонных вариаций УФР;
- Исследование многолетних вариаций УФР, получение климатических норм годовых вариаций УФР;
- Исследование глобальных и региональных пространственных особенностей распределения полей УФР;

### **Научная новизна**

Впервые получено проявление континентальных «структур» и горных массивов в глобальном распределении приземной УФР. Полученные результаты качественно совпадают с результатами аналогичных исследований глобальных распределений ОСО.

Впервые с использованием спутниковых данных TOMS в пространственных распределениях приземной УФР на территории России, и в частности Сибири, определены мезомасштабные неоднородности, которые, в ряде случаев, приводят к отклонению от выраженного широтного хода приземной УФР. Для территории России долготные неоднородности УФР летом могут достигать 20–30 %.

Впервые получено, что весенняя особенность вариаций приземной УФР, которая заключается в отклонении от естественного сезонного хода, определяемого угловой высотой Солнца, является спектрально-зависимой, т. е. амплитуда вариаций УФР в период весенней особенности возрастает с длиной волны.

**Достоверность** научных положений и полученных результатов подтверждается большим объемом экспериментального материала, на основе которого сделаны ключевые выводы работы, корректным использованием теоретических и экспериментальных методов обоснования полученных результатов, статистической надежностью измерений и применением общепринятых методик обработки данных и оценки точности результатов измерений. Полученные результаты анализировались и сопоставлялись с известными результатами других исследователей.

### **Практическая значимость работы**

Полученные в работе результаты могут быть использованы:

- для построения моделей регионального УФ-климата;
- для сравнительной оценки воздействия геофизических факторов на поведение приземной УФР в других регионах планеты.

Разработанное программное обеспечение может быть адаптировано для извлечения и обработки данных УФР других приборов, например прибора ОМІ спутника AURA.

**На защиту выносятся** следующие основные положения:

1. Результаты сопоставления спутниковых и наземных измерений УФР для г. Иркутска, показавшие их высокую корреляцию на длинных интервалах усреднения – месяц, год.

2. Пространственные вариации приземной УФР на территории России, содержащие мезомасштабные неоднородности, которые приводят к отклонению от выраженного широтного хода приземной УФР и появлению долготных неоднородностей, достигающих величин 20–30 %.

3. Особенности сезонных и многолетних вариаций приземной УФР, климатические нормы приземной УФР на территории Сибири, полученные с использованием спутниковых данных TOMS. Интерпретация весенней особенности вариаций УФР.

4. Программный комплекс для работы с данными приземной УФР, измеряемыми прибором TOMS.

**Личный вклад автора**

Все результаты, представленные в работе, получены лично автором или при непосредственном его участии. Автор работы создал программное обеспечение для работы со спутниковыми данными TOMS, участвовал в обработке данных измерений, анализе и интерпретации полученных результатов.

**Апробация работы**

Материалы, изложенные в работе, были представлены на IX–XII Международных симпозиумах «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы» (2002–2005 гг., Томск), на Научных сессиях молодых ученых «Гелио- и геофизические исследования» (2002, 2004 гг., Иркутск), на Всероссийских конференциях «Дистанционное зондирование поверхности Земли и атмосферы» (2003, 2004 гг., Иркутск), на Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (2004 г., Москва) а также регулярно обсуждались на семинарах отдела физики атмосферы ИСЗФ СО РАН.

**Структура и объем работы**

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка цитируемой литературы из 101 наименования. Общий объем диссертации составляет 115 страниц, включает 30 рисунков и 6 таблиц.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обосновывается актуальность диссертационной работы, определяются предмет и цели исследования, приводятся краткое изложение содержания диссертационной работы и положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** диссертационной работы приведены основные сведения о свойствах солнечного излучения, дан обзор основных атмосферных парамет-

ров, влияющих на изменчивость вариаций УФ-излучения. Представлен обзор современного состояния исследований приземной УФР в российской и зарубежной литературе.

Общие свойства солнечного излучения кратко изложены в разделе 1.1. Показано, что при прохождении через атмосферу Земли солнечная радиация поглощается и рассеивается атмосферными компонентами, в результате чего до поверхности Земли доходит излучение с длинами волн от 300 нм до 3 мкм. Указаны основные факторы, влияющие на уровень УФР в области спектра 300–400 нм.

Раздел 1.2 посвящен более детальному обзору атмосферных параметров, влияющих на уровень приземной УФР. В подразделе 1.2.1 исследовано влияние вариаций ОСО на уровень приземной УФР; рассмотрен механизм образования озонового слоя, приведены данные по основным полосам поглощения озона и кислорода в УФ-области спектра. Приведен обзор работ, посвященных исследованию связи УФР с вариациями ОСО в различных геофизических и метеорологических условиях, в различных местах земного шара, на разных временных масштабах. Показано, что количественные соотношения между изменениями величины ОСО и вызываемыми ими вариациями УФР существенным образом зависят от длины волны солнечного излучения. В среднем эти изменения составляют 1–6 % в диапазоне длин волн ~300–325 нм на 1 % изменения ОСО. При этом следует отметить, что соотношения, описывающие взаимосвязь между вариациями УФР и ОСО, зависят также от оптической массы озона или угловой высоты Солнца и от самих значений ОСО.

Кроме атмосферного озона важными факторами, оказывающими существенное влияние на уровень приземной УФР, являются облачность, атмосферный аэрозоль, альbedo земной поверхности и, в меньшей степени, другие атмосферные параметры (атмосферное давление, температурный режим атмосферы и т. д.). Влиянию указанных параметров на уровень приземной УФР посвящен подраздел 1.2.2. Вариации параметров состояния атмосферы могут оказывать различное и при этом спектрально-зависимое влияние на изменчивость приземной УФР. Величина влияния каждого из них может отличаться для различных регионов планеты, поскольку всегда существуют разнообразные региональные особенности состояния и динамики атмосферы. В подразделе приведен обзор работ, посвященных исследованию влияния облачности, аэрозоля и альbedo подстилающей поверхности на уровень УФР в различных регионах планеты.

Вторая глава диссертационной работы посвящена описанию методики измерения и обработки спутниковых данных по приземной УФР прибора TOMS.

В разделе 2.1 приведен обзор спутниковых методов измерения солнечного УФ-излучения. Показано, что при решении задач по выявлению региональных и глобальных пространственных особенностей в вариациях УФР целесообразно использовать спутниковые данные, которые имеют в этом случае ряд преимуществ по сравнению с наземными данными (например, высокая пространственная разрешающая способность).

Подраздел 2.1.1 содержит описание устройства и характеристики спектрографа TOMS. Приведены схематическое описание сканера прибора, оптико-механическая схема спектрографа, описаны режимы работы прибора.

Методика вычисления интенсивности эритемной УФР (ЭУФР) описана в подразделе 2.1.2. Данные интенсивности суммарной ЭУФР представляют собой оценку ежедневного интегрированного ультрафиолетового излучения области 280–400 нм (формула 1), при которой учитываются интенсивность солнечного излучения, падающего на верхние границы атмосферы Земли ( $S$ ), среднее расстояние от Земли до Солнца ( $d$ ), показатель ослабления облачности ( $C$ ), оптическая толщина облаков ( $\tau_{cl}$ ), зенитный угол Солнца ( $\nu$ ) и ОСО ( $\Omega$ ):

$$I = \frac{1}{d^2} \int_{\lambda_{280\text{нм}}}^{\lambda_{400\text{нм}}} d\lambda S(\lambda) W(\lambda) \int_{t_{\nu}}^{t_{\nu}} dt C(\lambda, \nu, \tau_{cl}) F(\lambda, \nu, \Omega) \quad (1)$$

Функция  $F$  описывает прямую и рассеянную радиацию, падающую на горизонтальную поверхность на высоте местности данного участка, которая зависит от ОСО, длины волны и зенитного угла Солнца. Значения функции  $F$  вычисляются с использованием таблицы решений уравнения переноса излучения.

Весовая функция  $W(\lambda)$  задается следующими значениями (длина волны указана в нм):

$$W(\lambda) = \begin{cases} 1, & \lambda < 298 \\ 10^{-0.094(\lambda-298)}, & 298 \leq \lambda \leq 328 \\ 10^{-0.015(\lambda-139)}, & 328 \leq \lambda \end{cases}$$

В подразделе 2.1.3 приведены данные о погрешности измерений приземного УФ-излучения спектрографом TOMS. Погрешности в определении интенсивности ЭУФР возникают как при вычислении физических величин, значения которых получены в лабораторных условиях, так и при расчетах с использованием радиационной модели атмосферы. Показано, что погрешность определения ЭУФР составляет  $\pm 12\%$ .

Раздел 2.2 содержит описание программного комплекса по извлечению и обработке спутниковых данных TOMS, созданного автором данной работы. Существовавшие на момент начала исследования программные продукты, позволявшие работать со спутниковыми данными TOMS, не были удобны при обработке больших массивов данных. Поэтому была поставлена задача разработать программный продукт, который был бы оптимизирован под быструю обработку больших объемов данных. Пакет программ состоит из четырех основных модулей, позволяющих извлекать и обрабатывать данные для любого участка поверхности Земли в области сетки  $1.25 \times 1$  или  $1 \times 1$  градус, строить карты глобального распределения дневных, месячных и годовых значений УФР как в целом для Земного шара, так и для территории Евразийского континента в частности, фильтровать массив данных по различным критериям, например, по ясным и облачным дням, строить долготно- и широтно-временные распределения приземной УФР для фиксированной широты/долготы. Изначально модульная структура комплекса была разработана таким образом, чтобы при появлении новых задач можно было быстро разработать и подключить новый модуль к существующему комплексу. Так, при появлении задачи написания модуля обработки и автоматической пересылки данных ЭУФР был разработан и внедрен в суще-

ствующий комплекс новый модуль, позволявший отображать на веб-ресурсе оперативные данные о состоянии приземного ультрафиолета в г. Иркутске [1].

С помощью разработанного комплекса были обработаны данные за период с 1979 по 2003 г. для земного шара в целом, для территории России и, в частности, для города Иркутска.

**В третьей главе** диссертационной работы приведены результаты исследования пространственных и временных вариаций приземной УФР на территории Сибири, в частности в г. Иркутске, за период 1979–2003 гг.

**Раздел 3.1** посвящен исследованию глобальных особенностей вариаций ЭУФР. В настоящее время вопросы исследования пространственных неоднородностей УФР, региональных и глобальных особенностей и их тенденций освещены крайне скудно. Между тем, существуют работы, указывающие на то, что эффекты в вариациях УФР, связанные с региональными особенностями, могут быть значительными [2]. Спутниковые методы измерения УФР представляются весьма информативными и ценными в плане изучения глобальных пространственных вариаций, хотя остаются нерешенными некоторые методические вопросы (например, влияние аэрозольной составляющей), ограничивающие точность определения ЭУФР [3]. Несмотря на это, данные, полученные прибором TOMS, установленным на спутниках «Nimbus-7», «Meteor», «Earth Probe», оказываются достоверными, в особенности при их усреднении на полугодовых и годовых интервалах. Нами было проведено сравнение спутниковых данных по ЭУФР и наземных данных по прямой УФР (длина волны 310 нм), полученных в г. Иркутске за период 1999–2001 гг. Наземные наблюдения околополуденной приземной УФР в Иркутске проводились в диапазоне длин волн 296–346 нм с помощью спектрометра, созданного на базе комплекса КСВУ-12 (ЛОМО). Подробное описание аппаратуры и методики измерения прямой УФР с помощью УФ-спектрометра дано в работе [4].

**Коэффициенты корреляции наземных и спутниковых данных**

Данные		1999–2001 гг.	1999 г.		2000 г.		2001 г.	
			I полугодие	II полугодие	I полугодие	II полугодие	I полугодие	II полугодие
Все дни	Исходные ряды	0.925	0.897	0.839	0.955	0.953	0.942	0.964
	Усредненные ряды	0.979	0.990	0.982	0.985	0.994	0.995	0.994
Ясные дни	Исходные ряды	0.958	0.946	0.940	0.978	0.972	0.951	0.974
	Усредненные ряды	0.976	0.992	0.989	0.994	0.994	0.987	0.996

В общем случае отмечается высокая корреляция между результатами наземных и спутниковых измерений на длинных интервалах усреднения – месяц, полгода, год (0.84–0.99). Полученные коэффициенты корреляции представлены в таблице. В результате проведенного сравнения были сделаны рекомендации по использованию спутниковых данных: при анализе использовать усреднение по длинным интервалам – месяц, полгода, год. Так, при исследовании глобаль-

ных особенностей пространственных вариаций полей УФР были выбраны месячные и годовые интервалы усреднения за период 1999–2001 гг.

Получены глобальные распределения ЭУФР, которые оказываются подобны глобальным распределениям ОСО, описанным в работе [5]. Но в глобальном распределении УФР должны дополнительно сказываться модулирующие эффекты облачности и аэрозольных атмосферных составляющих, которые, в принципе, в некоторых регионах и в отдельные периоды года могут быть сопоставимы с влиянием ОСО. Для исследования относительного вклада вариаций ОСО, облачности и альbedo подстилающей поверхности в наблюдаемые эффекты было проведено разделение исходного массива данных ЭУФР за 1999 г. на ясные и облачные дни. Такое разделение позволило выделить дни, когда определяющим являлось распределение ОСО (ясные дни), и дни, когда определяющим мог являться облачный режим атмосферы (облачные дни).

Анализ полученных изображений показал, что эффект континентальных структур отмечается как для ясных, так и для облачных дней, но наблюдаются некоторые отличия. В распределении для облачных дней континентальные структуры более выражены. В распределении ЭУФР для ясных дней очертания материков сохраняются, но исчезает контур Австралии, который становится более расплывчатым, чем в распределениях для облачных и всех исходных дней. Для облачных дней четко проявляется экваториальная зона низкой интенсивности УФР вдоль широты  $5^{\circ}$  N, которая для ясных дней отсутствует. Можно предположить, что наличие данной экваториальной зоны обусловлено значительной облачностью в зоне экватора в течение всего года [6]. Сохранение очертаний континентов в распределении ЭУФР для ясных дней можно объяснить ослаблением в атмосфере ЭУФР за счет влияния ОСО и/или влиянием различных альbedo подстилающей поверхности Земли.

В разделе 3.2 исследуются региональные особенности пространственных вариаций приземной ЭУФР. На основе спутниковых данных TOMS/«Earth Probe» нами был проведен анализ регионального (для России) пространственного распределения ЭУФР с использованием месячных и годовых интервалов усреднения за период 1999–2001 гг.

Для анализа пространственных вариаций строились средние за месяц карты изолиний ЭУФР для широтно-долготной области, включающей территорию России ( $>20^{\circ}$  в. д.), и долготные вариации УФР для фиксированных широт.

Исследование показало, что в средних за месяц суточных экспозициях ЭУФР отмечаются отклонения от естественного широтного хода УФР, обусловленного различными угловыми высотами Солнца. Эти отклонения приводят к долготным вариациям ЭУФР на фиксированных широтах, которые в июне могут достигать 20–30 %. Наименьшими средними значениями ЭУФР характеризуется район Приморья и Дальнего Востока ( $>130^{\circ}$  в. д.), что, возможно, связано с увеличением количества облачных дней в этом районе. Повышенными значениями ЭУФР выделяется регион Среднесибирского плоскогорья ( $90$ – $130^{\circ}$  в. д.).

В средних за месяц суточных экспозициях ЭУФР на территории России проявляются крупномасштабные и мезомасштабные неоднородности полей ЭУФР, обу-

словленные, вероятно, региональными особенностями (физико-географическими, орографическими, климатическими и др.). Крупномасштабные неоднородности ЭУФР в отдельных случаях могут быть сопоставлены с географическими структурами – Восточно-Европейской равниной, Западно-Сибирской низменностью, Среднесибирским плоскогорьем, районами Приморья и Дальнего Востока.

Примером мезомасштабных неоднородностей может быть поведение ЭУФР на 52° с. ш. в июне 2000 г. в диапазоне 90–100° в. д., когда величина средней дневной экспозиции УФР изменялась от ~3.4 до 4.4 кДж/м<sup>2</sup>. В различные сезоны уровни мезомасштабных неоднородностей могут быть разными. Так, в марте 1999 г. широтно-долготное распределение ЭУФР более структурировано по сравнению с сентябрем того же года, что может быть связано с весенней перестройкой и неустойчивостью циркуляционного режима атмосферы, а также с особенностями годового хода ОСО. Таким образом, полученные нами результаты на основе спутниковых данных дают новую, более точную информацию о распределении радиации, такую как более структурированное широтно-долготное распределение ЭУФР с выявлением мезомасштабных неоднородностей и межгодовые вариации распределений приземной ЭУФР.

Исследованию межсуточных и сезонных вариаций приземной ЭУФР посвящен раздел 3.3. Для анализа временных вариаций ЭУФР в регионах Сибири были использованы спутниковые данные TOMS/«Nimbus-7» (1979–1992 гг.) и TOMS/«Earth Probe» (1996–2003 гг.). С учетом перерыва в измерениях (с 1993 г. по август 1996 г.) анализировался временной интервал порядка 22 лет. Исследовались вариации ЭУФР вблизи городов: Новосибирск (55° с. ш., 83° в. д.), Томск (56.5° с. ш., 85° в. д.), Горно-Алтайск (51.5° с. ш., 85.6° в. д.), Красноярск (55.5° с. ш., 91.9° в. д.) и Иркутск (52° с. ш., 104° в. д.).

Отмечается сильная межсуточная изменчивость ЭУФР, на величину которой в первую очередь влияют вариации облачности и в меньшей степени вариации ОСО и аэрозольное состояние атмосферы. Наибольшими по амплитуде являются межсуточные вариации ЭУФР. Они связаны с естественным сезонным изменением угловой высоты Солнца и облачным режимом атмосферы. Сезонные вариации ЭУФР главным образом зависят от внутригодовой изменчивости ОСО и аэрозольного режима атмосферы.

Поскольку основным фактором, влияющим на приход УФР на поверхность Земли, является угловая высота Солнца, приземное УФ-излучение имеет четко выраженный суточный, сезонный и годовой ход [7]. Следуя естественному широтному ходу УФР, обусловленному различными угловыми высотами Солнца, среднегодовые значения доз приземной ЭУФР должны быть наибольшими в Горно-Алтайске и располагаться по убывающей в Иркутске, Новосибирске, Красноярске и Томске. Та же тенденция должна проявляться в максимальных значениях ЭУФР для каждого дня года по всем годам исследуемого временного периода. Наибольшие уровни доз ЭУФР отмечаются в регионе Горно-Алтайска. Однако естественное различие в средних многолетних уровнях ЭУФР за счет разницы в широтном расположении городов, которое хорошо прослеживается в зимние, осенние и весенние месяцы, в июне практически отсутствует. Этот

факт можно интерпретировать как проявление долготной зависимости в пространственном распределении приземной ЭУФР, приводящей к отклонению от широтного хода ЭУФР.

В среднегодовом ходе в летний сезон (особенно вблизи периода летнего солнцестояния) для всех анализируемых городов отмечаются колебания значений УФР с периодами порядка 10–14 дней (которые, возможно, обусловлены временами жизни основных синоптических объектов – циклонов и антициклонов и их комбинациями) с характерными пиками.

В разделе 3.4 обсуждается весенняя особенность сезонного хода приземной УФР, которая заключается в отклонении от естественного сезонного хода, определяемого угловой высотой Солнца. Для анализа указанной особенности были использованы спутниковые данные TOMS по приземной УФР для длин волн 310, 325 и 380 нм за период с 1997–2003 гг.

Было обнаружено, что в период весенней особенности амплитуда вариаций приземной УФР возрастает с длиной волны, т.е. особенность является спектрально-зависимой. Такая зависимость может наблюдаться при некоторых условиях (например, в условиях высокой прозрачности атмосферы, когда атмосфера по своим свойствам близка к рэлеевской, либо при высоком альbedo подстилающей поверхности, например, альbedo снега).

Были проведены специальные исследования с целью выявления причин возникновения весенней особенности сезонного хода приземной УФР. Проводился анализ вариаций приземной УФР, аэрозольной оптической толщи (АОТ), влагосодержания атмосферы. Исследования показали, что корреляционной связи между АОТ и УФР в период весенней особенности не выявлено, что может указывать на малое влияние АОТ на формирование особенности УФР. Весенняя особенность объясняется сходом устойчивого снежного покрова, что приводит к падению уровня альbedo, что, в свою очередь, снижает уровень рассеянной и как, следствие, суммарной УФР на фоне сравнительно низкой угловой высоты Солнца в начале весны. Растущая угловая высота Солнца со временем увеличивает поток прямой УФР, что вновь приводит к постепенному росту суммарной УФР.

В разделе 3.5 исследуются многолетние вариации приземной ЭУФР в некоторых регионах Сибири. Был проведен анализ многолетних вариаций относительных отклонений ежедневных значений приземной ЭУФР от среднегодового хода по спутниковым данным TOMS для городов, приведенных в параграфе 3.3, за периоды 1979–1992 гг. и 1996–2003 гг.

Средние относительные вариации ЭУФР достигают  $\pm 15$ – $20$  % при указанном интервале усреднения, хотя отмечаются выбросы до  $\pm 30$  % для горного региона Алтая и Новосибирска. Определялись линейные тренды и аппроксимации с использованием сглаживания полиномами пятой степени. Линейные тренды указывают на постепенный рост ЭУФР в рассматриваемом интервале лет. Если принять существование такого положительного тренда, то вариации ЭУФР могут быть связаны с наблюдаемым в некоторых регионах земного шара и широко обсуждаемым в последние десятилетия отрицательным временным трендом атмосферного озона.

В то же время аппроксимации полиномами 5-й степени указывают на тенденцию к уменьшению ЭУФР в последние годы. Одной из причин такого многолет-

него временного хода может быть существование более длительных периодов ( $\geq 10$ –20 лет) изменчивости ЭУФР. Кроме этого, наличие отрицательного тренда можно связать, например, с существованием положительной корреляции со сдвигом 2 года между солнечной активностью и концентрацией аэрозоля в приземном слое [8] и, как следствие, отрицательной корреляции солнечной активности с прозрачностью атмосферы [9].

Были проанализированы многолетние временные вариации средних значений ежедневных экспозиций ЭУФР для каждого месяца года. Для большинства месяцев (декабрь, январь, февраль, март, апрель, июль, август, октябрь, ноябрь) характер поведения временных трендов аналогичен: рост ЭУФР в 1979–1992 гг. и спад в 1996–2003 гг. В мае отмечается рост ЭУФР в 1996–2003 гг., а для сентября характерен спад в период 1979–1992 гг. Особый интерес представляют временные вариации в мае, в летние месяцы и в сентябре, когда значения интенсивности ЭУФР, а также их изменчивость максимальны.

В результате проведенного исследования были получены климатические нормы вариаций ЭУФР – многолетние годовые, сезонные, месячные средние значения и их повторяемости. Знание этих норм позволяет рассматривать соответствующие анализируемые величины для отдельных месяцев и лет как отклонение от этих норм, т.е. судить о характерном или аномальном поведении ЭУФР.

Был проведен спектральный анализ временных рядов ежедневных значений интенсивности приземной ЭУФР по 22 годам (для 1979–1992 и 1996–2003 гг.), сглаженных скользящим средним по 30 дням, для городов, приведенных в параграфе 3.3. Этот временной период охватывает 21-, 22- и 23-й циклы солнечной активности. В спектре анализируемого временного ряда присутствует широкий диапазон колебаний с различными периодами. Самый большой максимум соответствует периоду 1 год (и близким к нему периодам). Этот результат является совершенно естественным, поскольку наибольшие по амплитуде вариации УФР связаны с изменением угловой высоты Солнца (сезонные вариации) и этот период является основным.

В спектре временного ряда ЭУФР выделяются периоды, близкие к 2, 5, 11 и 22 годам (т.е. периоды проявления солнечной активности, с которыми часто коррелируют многие геофизические и метеорологические параметры), и другие периоды. Эти результаты являются свидетельством того, что ЭУФР, вероятно, опосредованным образом, через другие атмосферные параметры, например прозрачность атмосферы, ОСО, содержание аэрозолей и др., связана с солнечной активностью.

### **В заключении** сформулированы основные результаты работы.

1. Разработан и реализован программный комплекс для работы со спутниковыми данными прибора TOMS. С помощью данного комплекса были обработаны данные за период с 1979 по 2003 г. для всего земного шара в целом, для территории России и, в частности, для г. Иркутска.

2. Проведено сравнение спутниковых (TOMS) и наземных данных по прямой УФР в г. Иркутске. Отмечается высокая корреляция между результатами наземных и спутниковых измерений на полугодовых и годовых интервалах усреднения.

3. Получено проявление континентальных «структур» и горных массивов в глобальном распределении приземной ЭУФР. Полученные результаты качественно совпадают с результатами аналогичных исследований глобальных распределений ОСО, являющего одним из определяющих факторов поступления УФР на поверхность Земли.

4. При усреднении спутниковых данных ЭУФР за большие интервалы времени (более месяца) в пространственных распределениях ЭУФР над территорией России проявляются мезомасштабные неоднородности, что в ряде случаев приводит к отклонению от выраженного широтного хода ЭУФР.

5. Отмечается сильная межсуточная изменчивость ЭУФР, на величину которой влияют в первую очередь вариации облачности и в меньшей степени вариации ОСО и аэрозольного состояния атмосферы.

6. В среднегодовом ходе в летний сезон (особенно вблизи периода летнего солнцестояния) для некоторых городов Сибири отмечаются колебания значений ЭУФР с периодами порядка 10–14 дней, которые обусловлены временами жизни основных синоптических объектов – циклонов и антициклонов и их комбинациями.

7. В сезонном ходе во всех исследуемых городах Сибири обнаружена весенняя особенность в вариациях приземной УФР, заключающаяся в отклонении от естественного сезонного хода, определяемого угловой высотой Солнца.

8. Получено, что весенняя особенность вариаций УФР является спектрально-зависимой, т.е. амплитуда вариаций УФР в период весенней особенности возрастает с длиной волны.

9. Корреляционной связи между АОТ и УФР в период весенней особенности не выявлено, что может указывать на малое влияние АОТ на формирование особенности УФР. Весенняя особенность объясняется сходом устойчивого снежного покрова, что приводит к падению уровня альbedo, что, в свою очередь, снижает уровень рассеянной и, как следствие, суммарной УФР на фоне сравнительно низкой угловой высоты Солнца в начале весны. Растущая угловая высота Солнца со временем увеличивает поток прямой УФР, что вновь приводит к постепенному росту суммарной УФР.

10. Получены многолетние тренды приземной ЭУФР, которые дают постепенный рост ЭУФР в 21-м и 22-м циклах солнечной активности. В 23-м цикле ситуация может быть оценена по-разному в зависимости от способа аппроксимации полученных результатов.

11. Получены климатические нормы вариаций ЭУФР – многолетние годовые, сезонные, месячные средние значения и их повторяемости. Знание этих норм позволяет соответствующие анализируемые величины для отдельных месяцев и лет рассматривать как отклонение от этих норм, т.е. судить о характерном или аномальном поведении ЭУФР.

12. Проведенный спектральный анализ временных рядов ежедневных значений доз приземной ЭУФР позволил выделить, кроме естественной годовой гармоникой, периоды 11, 22, 5, 2 года, которые могут свидетельствовать о связи ЭУФР с солнечной активностью. Механизмы и каналы этой связи до настоящего времени не установлены и требуют дополнительных исследований.

Таким образом, на основании современных спутниковых данных по ЭУФР, наземных данных по прямой УФР, данных актинометрической сети «Аэронет» получены оценки приземной УФ-радиации на территории Сибири, в частности в г. Иркутске. Выявлена роль различных факторов, которые приводят к изменчивости УФР, и установлен ряд глобальных и региональных закономерностей пространственно-временных вариаций УФР.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Основные результаты исследований, изложенные в диссертационной работе, опубликованы в следующих печатных работах:

1. Тащилин М.А., Михалев А.В. Особенности глобального распределения эритемной ультрафиолетовой радиации: континентальные «структуры» // Сборник трудов V сессии молодых ученых «Гелио- и геофизические исследования». 2002. С. 136–137.

2. Михалев А.В., Тащилин М.А., Черниговская М.А., Шалин А.Ю. Эритемная ультрафиолетовая радиация по данным наземных и спутниковых измерений // Оптика атмосферы и океана. 2003. Т. 16, № 1. С. 63–67.

3. Mikhalev A.V., Tashchilin M.A., Chernigovskaya M.A., Shalin A.Yu. Erythemal ultraviolet radiation as deduced from data of ground-based and satellite measurements // Proceedings of SPIE. 2003. V. 5027. P. 258–265.

4. Михалев А.В., Тащилин М.А., Черниговская М.А. Пространственные и временные вариации эритемной ультрафиолетовой радиации по данным спутника EARTH PROBE // Солнечно-земная физика, 2004. Вып. 5. С. 128–130.

5. Тащилин М.А. Комплекс программ по обработке данных эритемной ультрафиолетовой радиации спутника «Earth Probe» // Солнечно-земная физика. 2004. Вып. 5. С. 130–133.

6. Кошелев В.В., Михалев А.В., Черниговская М.А., Тащилин М.А. Исследование изменчивости УФ-Б радиации разных временных масштабов // Современные достижения в исследованиях окружающей среды и экологии: Сб. науч. статей, посвящ. памяти акад. РАН В.Е. Зуева. Томск: СТТ, 2004. С. 226–233.

7. Черниговская М.А., Михалев А.В., Тащилин М.А. Пространственные и временные неоднородности полей эритемной ультрафиолетовой радиации над территорией России // Оптика атмосферы и океана. 2004. Т. 17, № 1. С. 81–85.

8. Mikhalev A.V., Tashchilin M.A., Chernigovskaya M.A. Spatial inhomogeneities of erythemal ultraviolet radiation fields // Proceedings of SPIE. 2004. V. 5397. P. 300–309.

9. Черниговская М.А., Михалев А.В., Тащилин М.А. Многолетние вариации эритемной ультрафиолетовой радиации в Иркутске по данным спутниковых измерений // Оптика атмосферы и океана. 2005. Т. 18, № 1–2. С. 160–166.

10. Черниговская М.А., Михалев А.В., Тащилин М.А. Многолетние вариации эритемной ультрафиолетовой радиации в регионах Сибири по данным спутниковых измерений // *Оптика атмосферы и океана*. 2005. Т. 18, № 12. С. 1095–1103.

11. Тащилин М.А. Ультрафиолетовая солнечная радиация / А.В. Михалев, М.А. Черниговская, М.А. Тащилин, А.Ю. Шалин // *Биоиндикация стратосферного озона*. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2006. С. 32–78. (Интеграционные проекты; Вып. 10).

12. Михалев А.В., Тащилин М.А. Некоторые задачи солнечно-земной физики, связанные с образованием и динамикой атмосферного аэрозоля // *Оптика атмосферы и океана*. 2007. Т. 20, № 6. С. 555–558.

13. Михалев А.В., Тащилин М.А. Аэрозольная оптическая толща атмосферы и ее вариации в регионе Восточной Сибири (Тункинская долина) в 2004–2008 гг. Сибири // *Оптика атмосферы и океана*. 2009. Т. 22, № 06. С. 575–578.

14. Тащилин М.А., Михалев А.В. Весенняя особенность сезонного хода приземной ультрафиолетовой радиации в некоторых регионах России // *Оптика атмосферы и океана*. 2010. Т. 23, № 3. С. 205–210.

### **Цитируемая литература**

1. Интернет-ресурс. <http://cgm.iszf.irk.ru/optic/optic.htm>.
2. Seckmeyer G., McKenzie R.L. Increased ultraviolet radiation in New Zealand (45S) relative to Germany (48N) // *Nature*. 1992. V. 359, № 6391. P. 135–137.
3. McPeters R.D., Bhartia P.K., Krueger A.J., Herman J.R. Earth Probe Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) Data Products User's Guide. NASA Goddard Space Flight Center, 1998. P. 70.
4. Шалин А.Ю., Михалев А.В. Выделение прямой ультрафиолетовой радиации при измерениях спектрофотометром с широкой входной апертурой // *Оптика атмосферы и океана*. 2002. Т. 15, № 4. С. 399–402.
5. Казимировский Э.С., Матафонов Г.К. Континентальные и орографические «структуры» в глобальном распределении общего содержания озона // *ДАН*, 1998. Т. 361, № 4. С. 544–546.
6. Селезнева Е.С. Курс метеорологии (физика атмосферы). Л.: Гидрометеоиздат, 1962. 419 с.
7. Белинский В.А., Гараджа М.П., Меженная Л.М., Незваль Е.И. Ультрафиолетовая радиация Солнца и неба. М.: Изд-во МГУ, 1968. 228 с.
8. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Ковалевский В.К., и др. Многолетняя изменчивость тропосферного аэрозоля над Западной Сибирью // *Оптика атмосферы и океана*, 2000. Т. 13, № 6–7. С. 627–630.
9. Ролдугин В.К., Старков Г.В. Изменение прозрачности атмосферы в 11-летнем цикле солнечной активности // *Докл. РАН*, 2000. Т. 370, № 5. С. 675–677.

Отпечатано в издательском отделе  
ИСЗФ СО РАН  
Заказ № 112 «30» марта 2011 г.  
Объем 16 с. Тираж 150 экз.