

Н.С. Иванова, Г.М. Крученицкий, А.А. Черников

СОЗДАНИЕ ПЕРВОЙ ОЧЕРЕДИ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА УФ-РАДИАЦИИ В РОССИИ

Центральная аэрологическая обсерватория, г. Долгопрудный Московской обл.

Поступила в редакцию 3.04.98 г.

Принята к печати 30.10.98 г.

Разработана и успешно прошла опытную эксплуатацию первая очередь системы мониторинга УФ-В-облученности территории России. Конфигурация системы позволяет в реальном времени оценивать состояние полей интегральной (по УФ-В-диапазону) облученности европейской части страны и обнаруживать районы, в которых уровни УФ-В-облученности аномально отклоняются от климатической нормы. Опытная эксплуатация показала, что 67% данных системы мониторинга отличаются от результатов контрольных наземных измерений не более чем на 20%, а 73% данных – не более чем на 25%.

Естественная ультрафиолетовая (УФ) радиация, составляющая малую долю в общем потоке солнечного излучения, достигающего земной поверхности, оказывает существенное влияние на состояние и развитие биосферы Земли. Это воздействие УФ-радиации на жизнедеятельность и эволюцию биологических систем (в том числе и человека) объясняется ее большой фотохимической и фотобиологической активностью.

Потоки биологически активной УФ-радиации у поверхности Земли, как известно, существенным образом зависят от состояния озонового слоя планеты. Общее содержание озона (СО) в атмосфере сильно изменяется во времени и пространстве. В настоящее время имеется тенденция к его уменьшению (особенно в полярных областях), что вызывает острую дискуссию в научных кругах о причинах такого уменьшения СО и о перспективах дальнейшего изменения общего содержания озона. Проводятся широкомасштабные исследования по выявлению возможных источников разрушения озона и наиболее активных озоноразрушающих веществ. Совершенствуются системы оперативного наблюдения за общим содержанием озона, пополняются банки данных и архивы, хранящие информацию об общем содержании озона и его вертикальном распределении за многие годы.

Однако следует ясно осознавать, что основной причиной пристального внимания человечества к изменениям озонового слоя является обусловленная его истощением опасность роста интенсивности УФ-радиации Солнца у поверхности Земли.

Если учесть, что суммарная УФ-радиация у поверхности Земли определяется не только величиной защитного озонового слоя, но и количеством общей облачности, высотой Солнца над горизонтом, альбедо подстилающей поверхности и рядом других факторов, то представляется целесообразным создание наблюдательной системы для оперативного получения информации непосредственно об облученности земной поверхности. Уменьшение общего содержания озона не обязательно вызывает резкий рост УФ-облученности территории. Он может компенсироваться увеличением количества общей облачности, повышением содержания аэрозоля и другими факторами. Поэтому измерение суммарной УФ-радиации, достигающей земной поверхности, дает наиболее объективную информацию об

опасности, угрожающей живым системам на планете при истощении озонового слоя [1].

Различные биологические системы неодинаково реагируют на изменения спектрального состава УФ-излучения. Поэтому целесообразно проводить регулярное измерение спектра естественной УФ-радиации. Такие измерения не просты. Они требуют прецизионной дорогостоящей аппаратуры, высококвалифицированного обслуживающего персонала, и пока рано говорить о систематических с высоким пространственным разрешением спектральных измерениях естественной УФ-радиации, охватывающих большие территории.

Реальным и одновременно достаточно информативным в настоящее время является создание системы наблюдения УФ-облученности в спектральном интервале, в котором ультрафиолетовое излучение наиболее биологически активно. Таким спектральным интервалом является «В»-область ультрафиолетовой части солнечного спектра (длины волн от 280 до 315 нм), которая характеризуется эритемным эффектом, бластомогенным действием, действием на домашних животных и птиц, влиянием на дикорастущие и культурные растения, на биологическое равновесие в водных экосистемах, а также на скорость протекания ряда фотохимических реакций.

Пространственная изменчивость физических параметров, определяющих интенсивность суммарной УФ-В-радиации у земной поверхности, существенна на масштабах от нескольких километров до нескольких сотен километров, поэтому поле интенсивности естественной УФ-В-радиации следует измерять с пространственным разрешением не менее нескольких десятков километров.

Такого разрешения можно достичь, используя спутниковые данные об облачности, альбедо, общем содержании и вертикальном распределении озона, а также эффективный алгоритм расчета переноса УФ-излучения через газы, аэрозоли и облака. Сегодня над территорией России практически отсутствуют систематические наблюдения вертикального распределения озона. Нет эффективных алгоритмов распознавания типов облачности, их высоты и оптической плотности. Мало данных о составе и высотном распределении аэрозоля. Тем не менее оценка распределения УФ-В-радиации над обширными территориями с хорошим пространственным разрешением и удовлетвори-

тельной погрешностью может быть получена, если выделить основные параметры, которые влияют на интенсивность суммарной естественной УФ-В-радиации у земной поверхности, и адекватно оценить степень их влияния. Такими параметрами являются общее содержание озона, количество общей облачности и альbedo подстилающей поверхности. Влияние остальных параметров можно учесть, используя данные статистических моделей.

В работе [2] выявлена эмпирическая зависимость интенсивности УФ-В-радиации у земной поверхности от ОСО, количества общей облачности и альbedo подстилающей поверхности. Она позволяет рассчитать поле УФ-В-облученности земной поверхности по спутниковым данным об облачности, альbedo и ОСО, которые имеют высокое пространственное разрешение. Можно использовать и данные об ОСО, получаемые со станций наземной озонметрической сети.

В настоящее время авторами разработана и успешно прошла опытную эксплуатацию в Центральной аэрологической обсерватории Росгидромета первая очередь системы мониторинга УФ-В-облученности территории России, использующая выявленную зависимость. Имеющаяся на сегодняшний день конфигурация системы позволяет в реальном времени оценивать состояние поля интегральной (по УФ-В-диапазону) облученности земной поверхности европейской части России и прилегающих территорий и обнаруживать районы, в которых уровни УФ-В-облученности аномально отклоняются от климатической нормы. Система УФ-В-мониторинга включает в себя систему озонного мониторинга [3], пункт приема спутниковой информации о состоянии полей облачности и подстилающей поверхности, принимающий данные с орбитальных спутников и стационарного спутника METEOSAT, центр обработки информации, в котором реализованы разработанные алгоритмы, и реперные станции измерения УФ-В-радиации. Координаты угловых точек карты территории земной поверхности, контролируемой первой очередью системы, слева направо и сверху вниз: (71,0°с.ш., 31,5°в.д.), (42,4°с.ш., 70,5°в.д.), (48,2°с.ш., 12,5°в.д.), (31,5°с.ш., 47,4°в.д.). Существующие и новые наземные пункты измерения УФ-В-облученности земной поверхности необходимы как реперные для привязки данных дистанционных измерений.

Для получения эмпирической зависимости, используемой в системе контроля УФ-В-облученности земной поверхности, в основу статистического анализа были положены соотношения для спектральной плотности суммарной радиации, полученные в результате приближенного решения методом Шустера интегродифференциального уравнения переноса ультрафиолетовой радиации в атмосфере [4]. После интегрирования по В-области УФ-спектра получено выражение, связывающее УФ-В-облученность земной поверхности с общим содержанием озона, высотой Солнца над горизонтом, количеством общей облачности и альbedo подстилающей поверхности [2].

В качестве исходных данных для эмпирического анализа были привлечены результаты одновременных измерений ОСО, УФ-В-облученности и количества общей облачности, которые регулярно проводятся в УкрНИГМИ (г. Киев) с июля 1990 г. В качестве озонметра используется прибор М-124, в качестве УФ-метра – модификация того же прибора, выполненная в ГГО и позволяющая проводить интегральные измерения в УФ-А (315–400 нм) и УФ-В (до 315 нм) диапазонах. Количество общей облачно-

сти определяется визуально. За время, прошедшее после опубликования работы [2], объем экспериментальных данных существенно увеличился, что дало возможность уточнить коэффициенты приведенной в указанной работе эмпирической зависимости. Экспериментальные данные были сгруппированы в зависимости от количества общей облачности в группы с шагом один балл. Далее была проведена аппроксимация экспериментальных данных выбранным эмпирическим соотношением методом наименьших квадратов.

Для качественной работы системы мониторинга УФ-В-облученности земной поверхности используется оперативная информация в виде карты количества общей облачности и карты общего содержания озона на выбранной территории. Оперативные карты количества общей облачности восстанавливаются по снимкам в ИК- и видимом диапазонах, получаемым с геостационарного спутника METEOSAT. За сутки можно получить 48 изображений земного шара в каждом спектральном диапазоне. Карта общего содержания озона строится по данным наземной озонметрической сети [3], которые ежедневно поступают по телеграфу в Центральную аэрологическую обсерваторию для пополнения банка данных «Озонметрия».

В УФ-В-области из естественных поверхностей только снег обладает значительным альbedo, достигающим для свежеснежного покрова 80–85%. Альbedo других естественных поверхностей незначительно [4]. Поэтому в системе контроля УФ-В-облученности для условий, когда земная поверхность покрыта снежным покровом, принято альbedo, равное 70%, в противном случае – альbedo равно 0% (по аналогии с [4]). В дальнейшем оно может уточняться по снимкам земной поверхности, получаемым с ИСЗ.

Используемые эмпирические соотношения позволяют получать как оперативную информацию об УФ-В-облученности земной поверхности на каждый конкретный день, так и ее климатические значения, если работать с климатическими базами данных по количеству общей облачности и общему содержанию озона. Для этой цели в рамках системы мониторинга УФ-В-облученности земной поверхности созданы базы данных «Климатология облачности» и «Климатология снежного покрова». Они построены на основе многолетних данных о количестве общей облачности и датах установления и схода снежного покрова, полученных при наземных наблюдениях и приведенных в [5–7]. Климатические данные по общему содержанию озона поступают из банка данных «Озонметрия».

В системе по желанию пользователя рассчитывается среднеинтегральная за светлое время суток суммарная УФ-В-облученность или энергетическая экспозиция в 1600 узлах сетки карты контролируемой территории. В каждой из этих точек в светлое время суток не реже чем через час вычисляется по астрономическим формулам высота Солнца над горизонтом. По этим же формулам вычисляются время восхода и время захода Солнца и долгота дня в выбранной точке. Затем по данным спутниковых снимков об облачности и альbedo подстилающей поверхности и данным об общем содержании озона в каждой точке рассчитывается интенсивность суммарной УФ-В-радиации. Результаты расчетов интегрируются по времени, чтобы получить энергетическую экспозицию за сутки. Для вычисления среднеинтегральной УФ-В-облученности полученное значение энергетической экспозиции делится на долготу дня в выбранной точке.

Если спутниковая информация об облачности поступает с интервалами, превышающими один час,

имеющиеся данные линейно интерполируются в промежуточные области, чтобы интегрирование интенсивности суммарной УФ-В-радиации проводилось по отсчетам, отстоящим друг от друга не более чем на час. При расчете климатических значений УФ-В-облученности суточный ход количества общей облачности не учитывается, но так же, как и в оперативном режиме, проводятся почасовые вычисления интенсивности суммарной УФ-В-радиации от восхода до захода Солнца.

В системе мониторинга проводится также расчет средних квадратических отклонений климатических норм УФ-В-облученности и энергетической экспозиции. Для этого используются данные средних квадратических отклонений среднего суточного количества общей облачности из базы данных «Климатология облачности». Средние квадратические отклонения средних суточных значений общего содержания озона поступают из банка данных «Озонометрия». Среднее квадратическое отклонение климатического значения альbedo подстилающей поверхности принято равным 0,1.

Выходной информацией системы мониторинга УФ-В-облученности земной поверхности являются два файла, содержащие данные о среднеинтегральной за светлое время суток суммарной УФ-В-облученности и об энергетической экспозиции суммарной УФ-В-радиацией за день. В файлах, кроме оперативных данных за конкретный выбранный оператором день, содержится также информация о климатических значениях, о значениях среднего квадратического отклонения и об отклонениях оперативных данных от климатической нормы. Кроме этого, в файлах заключена информация о территории, на которой в выбранный день репрезентативно восстанавливаются поля естественной суммарной УФ-В-радиации.

Программы визуализации позволяют строить карты с изолиниями уровней облученности для двенадцати

типов полей (шесть типов карт для полей среднеинтегральной за светлое время суток интенсивности суммарной УФ-В-радиации и шесть аналогичных карт для полей энергетической экспозиции земной поверхности суммарной УФ-В-радиации): 1) поля оперативных значений облученности территории; 2) поля климатической нормы облученности территории; 3) поля среднеквадратических отклонений (стандартных отклонений) климатической нормы облученности; 4) поля отклонений оперативных значений облученности территории от климатической нормы в абсолютных единицах; 5) поля отклонений оперативных значений облученности территории от климатической нормы в единицах стандартных отклонений; 6) поля отклонений оперативных значений облученности территории от климатической нормы в процентах. В качестве примера на рис. 1 приведена карта поля среднеинтегральной за светлое время суток интенсивности суммарной УФ-В-радиации для 10 апреля 1997 г. Карты могут быть также цветными (области между изолиниями закрашиваются в соответствии с цветовой шкалой уровней).

Весной и летом 1995 г. проведена опытная эксплуатация первой очереди системы мониторинга УФ-облученности территории России, в ходе которой проводилось сравнение данных системы мониторинга с результатами реперных измерений. В качестве реперных измерителей УФ-радиации в первой очереди системы мониторинга УФ-В облученности земной поверхности используются приборы, которые являются модификацией прибора М-124, выполненной в ГГО и позволяющей проводить интегральные измерения в УФ-В-диапазоне. Погрешность измерений таким прибором составляет около 20%.

Расположены реперные измерители в следующих пунктах: станция «Санкт-Петербург» (59.97°с.ш., 30.30°в.д.); станция «УкрНИГМИ», г. Киев (50.40°с.ш., 30.45°в.д.).

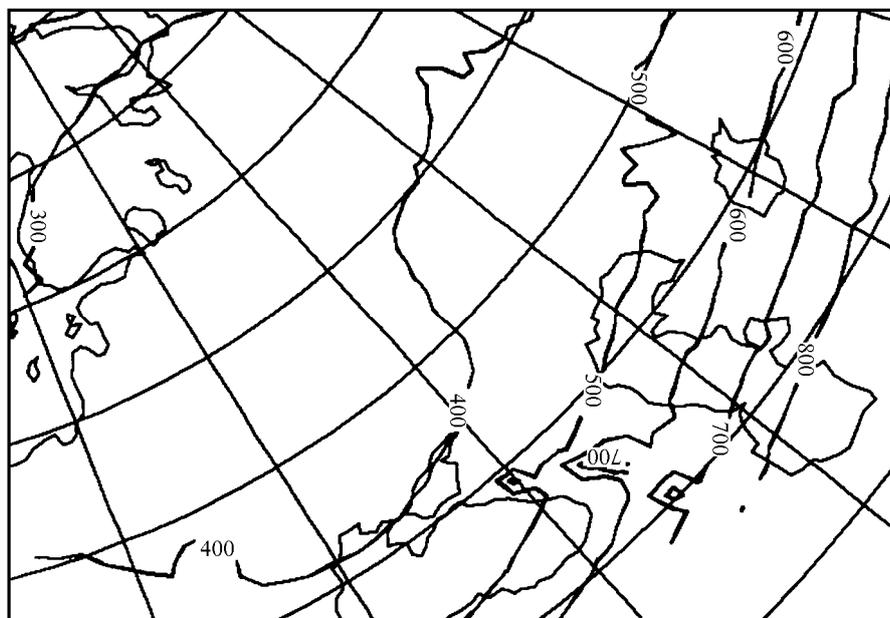


Рис. 1. Карта поля среднеинтегральной за светлое время суток интенсивности суммарной УФ-В-радиации для 10 апреля 1997 г.

На обеих контрольных станциях реперной сети ежедневно (если позволяли метеорологические условия) в

период опытной эксплуатации первой очереди системы мониторинга УФ-облученности земной поверхности про-

водились в различное время суток многократные измерения УФ-радиации с одновременными измерениями общего содержания озона и количества общей облачности. Для сравнения данных системы мониторинга с результатами контрольных измерений приборами реперной сети выбирались такие дни, когда проводилось не менее пяти измерений УФ-В-радиации на контрольной станции. В этом случае погрешность определения энергетической экспозиции земной поверхности за сутки или среднеинтегральной за светлое время суток интенсивности УФ-В-радиации контрольным прибором в реперной точке составляла примерно 18–20%. Для станции «УкрНИГМИ» таких дней за период опытной эксплуатации оказалось 106, а для станции «Санкт-Петербург» такие данные были предоставлены за 53 дня.

Анализ материалов сравнения данных системы мониторинга УФ-В-радиации с результатами контрольных измерений приборами реперной сети в период опытной эксплуатации показывает, что в широтной полосе, охватываемой первой очередью системы, заложенная в систему мониторинга методика восстановления полей УФ-В-

облученности земной поверхности дает хорошие результаты. За период опытной эксплуатации 67% данных системы мониторинга отличаются от результатов контрольных наземных измерений не более чем на 20%, а 73% данных – не более чем на 25%. Среднее значение модуля относительной разницы сравниваемых результатов за период опытной эксплуатации составляет примерно 22%. Если учесть, что погрешность самих контрольных измерений также около 20%, то можно сделать вывод о репрезентативности восстановленных системой мониторинга полей УФ-В-облученности контролируемой территории.

Результаты сравнения данных системы мониторинга УФ-В-облученности земной поверхности с результатами контрольных измерений приборами станций «УкрНИГМИ» и «Санкт-Петербург» приведены в виде гистограмм на рис. 2. На гистограмме представлено распределение количества случаев в зависимости от различия данных системы мониторинга и контрольных измерений. Количество случаев приведено в относительных единицах (нормировано на максимальное значение).

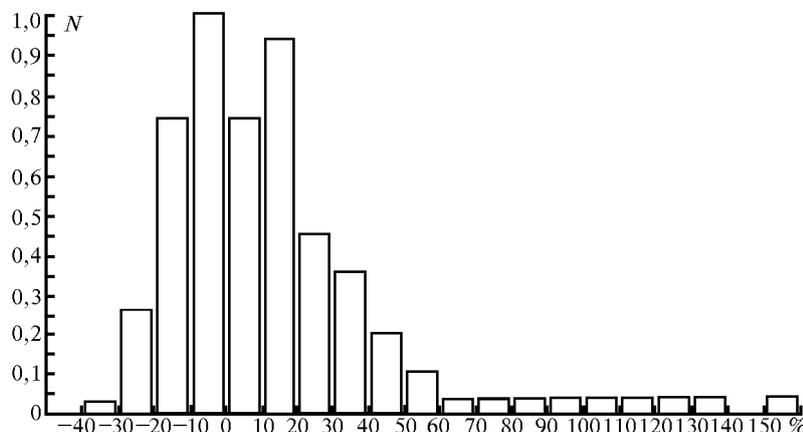


Рис. 2. Гистограмма распределения результатов сравнения данных системы мониторинга и контрольных измерений

За период опытной эксплуатации система мониторинга в контрольных точках не регистрировала случаев ложной тревоги или пропуска цели, если за тревожную принимать ситуацию, когда УФ-В-облученность земной поверхности превышает климатическую норму на 2,5–3,0 стандартных отклонения.

В перспективе система мониторинга будет расширена на территорию Сибири и Дальнего Востока, что позволит контролировать облученность земной поверхности УФ-В-радиацией на всей территории Российской Федерации. Для этого необходимо изучить возможности получения и обработки снимков с других, работающих в настоящее время спутников, дающих информацию о количестве общей облачности на новых территориях, а также разработать программно-алгоритмическое обеспечение для использования сетевых наземных данных об облачности в районах, где отсутствует спутниковая информация. При условии регулярной работы спектральных приборов, измеряющих УФ-радиацию Солнца, система мониторинга может быть переведена на кон-

троль облученности в более узких спектральных интервалах.

Авторы благодарны А.В. Белявскому и Г.П. Гушину за предоставленную возможность воспользоваться имеющимися у них экспериментальными данными.

1. *Ultraviolet Radiation. Environmental Health Criteria.* World Health Organization. Switzerland. 1994. N 160. 357 p.
2. Белявский А.В., Захаров В.М., Крученицкий Г.М. // *Оптика атмосферы.* 1991. Т. 4. N 9. С. 987–994.
3. Кадыгрова Т.В., Фиолетов В.Э. // *Атмосферный озон.* М.: Гидрометеоздат, 1990. С. 89–96.
4. Белинский В.А., Гараджа М.П., Меженная Л.М., Незваль Е.И. *Ультрафиолетовая радиация Солнца и неба.* М.: Изд-во МГУ, 1968. 228 с.
5. Берлянд Т.Г., Строкова Л.А. *Глобальное распределение общего количества облаков.* Л.: Гидрометеоздат, 1980. 71 с.
6. *Научно-прикладной справочник по климату СССР.* Сер. 3. Многолетние данные. Л.: Гидрометеоздат, 1989.
7. *Справочник по климату СССР. Устойчивость и точность климатических характеристик.* Т. 3. Облачность. Атмосферные явления. Л.: Гидрометеоздат, 1976. 491 с.

N.S. Ivanova, G.M. Kruchenitsky, and A.A. Chernikov. Creation of the First Stage of UV-Radiation Monitoring System in Russia.

The first phase of an UV-B irradiation monitoring system in Russia has been developed and experimentally operated. Its configuration permits real-time estimation of the state of integral (UV-B spectrum range) radiation fields in the European part of this country and finding of the regions where UV-B radiation levels abnormally deviate from the climatic norm. The test operation performed has demonstrated that 67% of the data obtained by the monitoring system differ from reference ground-based measurements by no more than 20%, the rest 73% differ by no more than 25%.