

УДК 551.501.793:510.536

Л. М. Белокриницкая¹, А. В. Белявский², Г. М. Крученицкий³

¹Київський національний університет імені Тараса Шевченка

²Український науково-дослідний інститут гідрометеорологічних досліджень, Київ

³Центральна аерологічна обсерваторія Росгидромету, Долгопрудний, Росія

**Украинская национальная система мониторинга
УФ-Б-радиации**

Надійшла до редакції 17.11.03

На основі аналізу результатів прямих вимірювань розроблено емпіричну модель для розрахунку спектральної щільності УФ-Б-опроміненості земної поверхні за даними про загальний вміст озону і бал загальної хмарності. Розраховані відповідні кліматичні норми та обґрунтовано методику мапування полів у абсолютних одиницях і відхиленнях від цих норм.

Интерес к мониторингу спектральной плотности энергетической облученности (СПЭО) земной поверхности биологически активным УФ-излучением Солнца обусловлен наблюдавшимися в последние десятилетия изменениями в состоянии озонового слоя Земли. Как известно, атмосферный озон является сильным поглотителем биологически активного УФ-излучения Солнца, к которому относят т. н. УФ-Б-диапазон, т. е. излучение с длинами волн $\lambda\lambda = 280...315$ нм. Уменьшение общего содержания озона (ОСО), отмечавшееся в 80—90 гг. прошлого века, породило опасения возрастания уровней СПЭО УФ-Б-радиации до значений, могущих причинить вред здоровью людей, а также состоянию и развитию широкого класса биологических и экологических систем, начиная от сельскохозяйственных злаков и кончая морскими цепями питания. Совершенно очевидно, что на уровни СПЭО УФ-Б-радиации оказывают влияние три основных фактора: общее содержание озона X , зенитный угол Солнца Z и балл общей облачности (БОБ). Другие факторы, такие как вертикальное распределение озона, микроструктурные и микрофизические параметры облачных частиц, состояние подстилающей поверхности и т. д. на уровни влияют слабо. Поэтому организация мониторинга СПЭО УФ-Б-радиации для больших территорий не может основываться на данных прямых инструментальных измерений, так

как пространственная изменчивость облачных полей очень велика, а стоимость приборов для измерения СПЭО весьма высока (~ 100000 долларов США). Прямые измерения в таких условиях могут выполнять лишь контрольные функции, а поля СПЭО должны рассчитываться по значениям параметров, которые легко картируются с помощью наблюдательных средств космического базирования. Такой расчет, как показывают исследования интегральной (по спектру) УФ-Б-облученности [1, 2] может базироваться на эмпирической модели, устанавливающей регрессионную зависимость между УФ-облученностью и перечисленными выше основными параметрами. Для построения такой модели безусловно необходимы данные об ОСО и БОБ, измеренных синхронно с УФ-Б-облученностью.

Станции, данные которых использованы для построения модели

Номер станции (код ВМО)	Название	Период	Широта (N)	Долгота (W)
077	Churchill	1992—2002	58°	94°
021	Edmonton	1992—2002	54	114
084	Halifax	1992—2002	45	64
071	Regina	1995—2002	50	105
024	Resolute	1991—2002	75	95
241	Saskatoon	1991—2002	52	107
083	Toronto	1989—2002	44	79

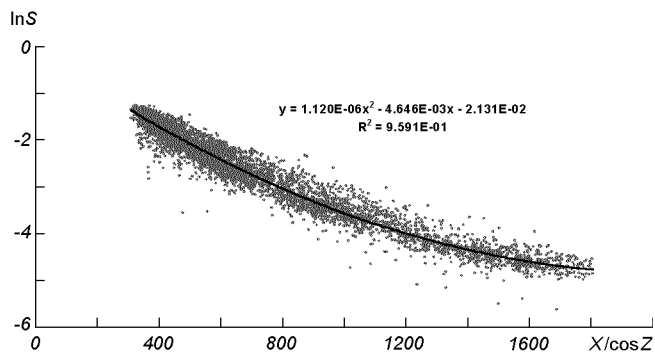


Рис. 1. Экспериментальные (точки) и модельные (линия) значения СПЭО для общей облачности 1-2 балла и длины волны 315 нм

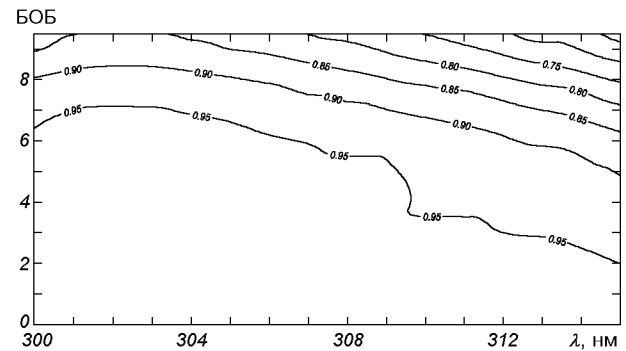


Рис. 2. Зависимость коэффициента детерминации модели от длины волны и балла общей облачности

Мировой центр данных об озоне и УФ-радиации (МЦД ВМО) в Торонто располагает такими данными только для семи станций мировой УФ-метрической сети (см. таблицу). Они были использованы в полном объеме для построения регрессионной зависимости СПЭО (S) вида

$$\frac{\tilde{S}(\lambda)}{S_0(\lambda)} = \exp \left[A(\lambda) \frac{X^2}{\cos^2 Z} + B(\lambda) \frac{X}{\cos Z} + C(\lambda) \right], \quad (1)$$

где $S_0(\lambda)$ — единица измерения СПЭО, (единичная спектральная плотность, имеющая размерность $[m][t]^{-3}[I]^{-1}$), $\tilde{S}(\lambda)$ — размерное значение СПЭО. Такой вид зависимости был определен из следующих соображений:

- линейные члены в показателе экспоненты соответствуют закону Бугера;
- квадратичный член добавлен для учета эффекта Форбса при больших значениях оптической толщины поглощающего слоя ($X/\cos Z$).

Эмпирические коэффициенты $A(\lambda)$, $B(\lambda)$ и $C(\lambda)$ были рассчитаны методом наименьших квадратов по данным измерений на семи упомянутых станциях для всех значений балла общей облачности с шагом 2 и длин волн $\lambda = 300 \dots 315$ нм с шагом 0.5 нм. Дискретность длин волн соответствует спектральному разрешению спектрофотометров Брюера, которыми оснащены станции. Эмпирические модели для длин волн короче $\lambda = 300$ нм не строились из-за слишком малой интенсивности солнечного излучения для широтного пояса, в котором расположены Канада и Украина. Шаг 2 балла по диапазону общей облачности был выбран как по причине низкой точности его визуальных оценок, так и потому, что точность синхронизации данных о БОБ и спектральной плотности УФ-Б-облученности составляла 30 мин, что делало необходимым

вариации БОБ внутри названного временного интервала. Качество аппроксимации результатов измерений формулой (1) для одного из 186 вариантов сочетаний БОБ и длины волны приведено на рис. 1. Приводятся также значения параметров модели и коэффициента детерминации $R^2 = 1 - \sigma_r^2 / \sigma_x^2$, где σ_r^2 — дисперсия остатков, а σ_x^2 — дисперсия исходного ряда. Высокое значение коэффициента детерминации ($\approx 96\%$) показывает, что модель достаточно адекватна.

Эффективность эмпирической модели (1) в целом иллюстрирует рис. 2, на котором изображена зависимость коэффициента детерминации R^2 от длины волны и БОБ. Как и следовало ожидать, коэффициент детерминации уменьшается с увеличением длины волны и балла общей облачности. Это объясняется увеличением влияния главного из факторов, который не был учтен при построении модели — микроструктурных и микрофизических параметров облачности. Учесть этот фактор было в принципе невозможно, так как измерения названных параметров носят эпизодический характер, и получение оперативной информации о них, необходимое для решения мониторинговых задач, вряд ли возможно в обозримом будущем. Вместе с тем из рис. 2 видно, что эффективность эмпирической модели (1) и так достаточно высока, особенно в том диапазоне длин волн и БОБ, где можно ожидать опасно высоких значений СПЭО.

Важным преимуществом построенной эмпирической модели является то обстоятельство, что значения полей обоих параметров, которые необходимы для расчета полей СПЭО, можно оперативно получать практически для любого региона Земли, используя постоянно действующие наблюдательные средства космического базирования. Применитель-

но к общему содержанию озона речь идет об аппаратуре TOMS, которая почти непрерывно функционирует с ноября 1978 г. на борту различных космических аппаратов (последние семь лет на «Earth Probe»). Эта аппаратура, данные с которой практически в реальном времени поступают в интернет (<http://toms.gsfc.nasa.gov>), обеспечивает пользователя информацией о значении ОСО в местный полдень по всему земному шару, исключая область полярной ночи, с пространственным разрешением 1° по широте и 1.25° по долготе и темпом обновления информации 1 сут.

Информация о балле общей облачности может быть получена из изображений земной поверхности видимого и ИК-диапазона, поступающих от геостационарных и орбитальных спутников. Эта информация в обработанном виде (т. е. в виде изображений облачности) имеется на сайте <http://www.sat.dundee.ac.uk/auth.htm>, где обновляется каждые 6 ч. Нами было разработано программное обеспечение, позволяющее оперативно усваивать спутниковую информацию об ОСО и БОБ, рассчитывать, архивировать и визуализировать с временным разрешением один сутки как поля СПЭО, так и интегральную по спектру энергетическую освещенность в любом поддиапазоне спектрального интервала $\lambda\lambda = 300...315$ нм для любого времени дня. Разумеется, режимы временного интегрирования и усреднения также предусмотрены. В качестве примера на рис. 3 приведен образец соответствующей карты.

Карты абсолютных значений СПЭО позволяют вести ряд медико-санитарных и сельскохозяйственных исследований, например расчет эритемных доз УФ-облученности в курортных зонах или учет

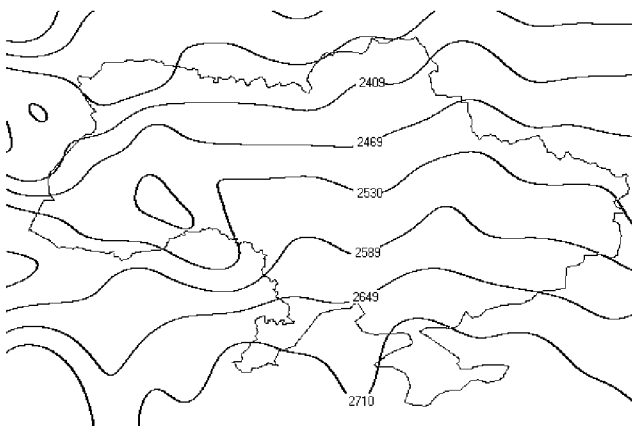


Рис. 3. Образец карты полуденных значений СПЭО на длине волны 315 нм. Значения изолиний приведены в $\text{мкВт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{нм}^{-1}$

УФ-облученности с/х угодий в период вегетации растений, однако они не дают возможности делать заключение об отличиях конкретных реализаций режимов УФ-облученности от нормы.

По формуле (1) были рассчитаны климатические нормы СПЭО для Украины. Под климатическими нормами мы понимаем средние значения и средние квадратичные отклонения (СКО) следующих величин (для каждого дня года и каждой длины волны):

- СПЭО в местный полдень;
- интегральное (по времени) значение СПЭО за световой день;
- средняя спектральная плотность мощности за световой день.

Для расчета этих величин необходимо было построить климатические нормы как балла общей облачности, так и ОСО для всей территории Украины. Климатические нормы балла общей облачности были заимствованы нами из климатического справочника [3], так как архивы спутниковых изображений поверхности Земли в видимом и ИК-диапазонах, полученных с геостационарных и орбитальных ИСЗ, не являются общедоступными. Расчет климатических норм ОСО был выполнен нами по архиву данных аппаратуры TOMS за период с ноября 1978 г. по октябрь 2002 г. Расчет осуществлялся отдельно для каждой 9×16 ячеек сетки TOMS, приходящейся на территорию Украины, (сетка TOMS покрывает поверхность Земли с шагом 1° по широте и 1.25° по долготе). Ячейки, представляющие собой элемент разрешения аппаратуры TOMS, центрованы на широты $-90^\circ + (k + 0.5) \cdot 1^\circ$ и долготы $-180^\circ + (n + 0.5) \cdot 1.25^\circ$, где k — целое число от 0 до 179, а n — целое число от 0 до 287), на основе разложения значений ОСО в ряд Фурье:

$$X(t) = \sum_{k=0}^n a_k \cos\left(\frac{2\pi k}{365.25} t + \varphi_k\right) + \text{rest}(t), \quad (2)$$

где t — число юлианских дней от начала года, φ_k — фаза k -й гармоники, $\text{rest}(t)$ — сумма отброшенных (статистически не значимых) гармоник. Здесь для каждой из ячеек удерживались только те амплитуды Фурье, которые имеют доверительную вероятность не менее чем 95 % по критерию Стьюдента. В качестве среднего значения для каждого дня принималась сумма ряда Фурье, а в качестве стандартного отклонения — СКО ряда $\text{rest}(t)$. Наличие климатических норм для СПЭО, БОБ и ОСО дает возможность не только обнаруживать аномальные (т. е. отклоняющиеся более чем на 2.5СКО от нормы) значения СПЭО, но и диагностировать их, то есть выявлять причину появления

аномалии, которая может состоять в аномально низких значениях как ОСО, так и БОБ.

Таким образом, были разработаны и программно реализованы алгоритмы построения карт значений СПЭО УФ-Б-облученности территории Украины, а также их отклонений от климатической нормы в абсолютных единицах, процентах и единицах среднего квадратичного отклонения (СКО) по данным измерений общего содержания озона и облачного покрова с космических платформ («Earth Probe» и «Meteosat»). Полученные результаты позволяют оперативно осуществлять мониторинг СПЭО территории Украины, надежно обнаруживать и диагностировать возникающие аномалии и своевременно оповещать о них население и органы государственного управления.

Кроме того, используя возможности национальной системы можно, опираясь на результаты наземных измерений БОБ, провести исследования долгосрочных изменений СПЭО и выделить относительный вклад в эти изменения аномалий ОСО и БОБ.

1. Белявский А. В., Грищенко В. Ф., Крученицкий Г. М. и др. Эмпирическая модель для расчета солнечной ультрафиолетовой облученности по данным измерений, выполненных в ходе Второй Украинской Антарктической экспедиции // Науч. тр. УкрНИИГМИ.—1999.—Вып. 247.—С. 30—35.
2. Белявский А. В., Захаров В. М., Крученицкий Г. М. Влияние облачности на обнаружимость трендов УФ-Б-облученности, обусловленных уменьшением общего содержания озона // Оптика атмосферы.—1991.—4, № 9.—С. 987—994.
3. Научно-прикладной справочник по климату СССР. — Л.: Гидрометеиздат, 1989.—Сер. 3, ч. 1—6, вып. 16.—С. 45—61.

UKRAINIAN NATIONAL SYSTEM OF UV-B IRRADIANCE MONITORING

L. M. Belokrinitskaya, A. V. Belyavsky, G. M. Kruchenitsky

On the basis of analysis of direct measurement results, an empirical model for UV-B spectral density calculations is developed. The model relates spectral density with column ozone and total clouds amount. Climatic mean values for spectral density are calculated and maps of its absolute values and anomalies are built.