

## Вариант методики ретроспективного моделирования годовых доз биоэффектов солнечного УФ излучения

Н.В. Дорожко, Е.И. Сидоркина, Л.Н. Турышев, А.Г. Светашев

Разработана и применена методика ретроспективного анализа доз биоэффектов приземного солнечного УФ излучения. Отмечена перспективность предложенного подхода модельной оценки, которая в сочетании с данными о прозрачности водных слоев в УФ диапазоне 285–400 нм позволит распространить данные оценки на водные системы природных и техногенных водоемов Беларуси, а также Антарктического региона.

**Ключевые слова:** ретроспективное моделирование, дозы, биоэффет, излучение.

A method for retrospective analysis of doses of bioeffects of surface solar UV radiation has been developed. The proposed approach of the model assessment is shown to be promising, which, in combination with the data on the transparency of water layers in the UV range of 285–400 nm, will make it possible to extend the assessment data to the water systems of natural and man-made water bodies of Belarus, as well as the Antarctic region.

**Keywords:** retrospective modeling, doses, bioeffect, radiation.

При проведении климатических исследований воздействия солнечного УФ излучения на биологические и экологические системы представляет интерес сопоставление и анализ данных за большие периоды времени.

В работе представлен вариант методики численного моделирования мощностей доз основных биоэффектов, позволяющий проводить как ретроспективные, так и прогнозные исследования УФ облученности для локальных пунктов наблюдения. Методика может быть использована для исследования обширных территорий и позволяет проводить валидацию по спутниковым данным.

На рисунке 1 изображена блок-схема алгоритма ретроспективного численного моделирования месячных и годовых доз основных биоэффектов приземного солнечного ультрафиолетового излучения, согласно использованной методике.

В основе методики заложен оптимальный метод расчета суточных доз биоэффекта эритемы, разработанный в НИИЦ МО БГУ и апробированный в процессе многолетних инструментальных исследований УФ облученности поверхности и водных сред на территории Республики Беларусь и в Антарктическом регионе при проведении сезонных Белорусских антарктических экспедиций [1]–[3].

Расчёт сезонных и годовых эритемных доз в рамках основного базового алгоритма, разработанного на основе пакета LibRadtran 2.0 [4] с использованием наземных и спутниковых данных, требует много времени, таким образом, для климато-биологических исследований возникает задача оптимизации расчетов.



Рисунок 1 – Блок-схема алгоритма численного моделирования доз биоэффектов приземного солнечного УФ излучения

В национальном научно-исследовательском центре мониторинга озоносферы БГУ Ю.И. Атрашевским был разработан вариант оптимизации расчетов, однако он требовал современных доработок, которые указаны в новой версии, применяемой в данном исследовании.

При расчете необходимо учитывать соотношение суточной дозы биоэффекта эритемы к показателю ультрафиолетового индекса (коэффициент  $K$ ), это позволяет упростить расчет.

$$K = \frac{S}{UVI}, \quad (1)$$

где  $S$  – интегральная суточная эритемная доза ( $\text{Дж}/\text{м}^2$ ),  $UVI$  – показатель ультрафиолетового индекса.

В таком случае за показатель УФ индекса принимается мощность эритемной дозы ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ) в полдень, умноженная на 40. Аналитические выражения для спектров действия основных биоэффектов УФ излучения взяты в соответствии с [5].

При наличии графика суточного хода мощности эритемной дозы для каждого дня года коэффициент  $K$  будет определяться как отношение площади под графиком к значению дозы в максимуме, умноженному на 40.

В период с 22 июня по 22 декабря Земля находится на минимальном и максимальном расстояниях от Солнца, а значит орбита симметрична. Поскольку годичная кривая также симметричная, то достаточно взять для анализа эти два периода.

Для построения кривой рассчитывались значения коэффициента  $K$  для 22-ого дня месяцев: июнь, июль, август, сентябрь, октябрь, ноябрь и декабрь. Для каждого из семи выбранных дней строились показатели отношения солнечного зенитного угла от времени суток. Важным моментом при этом являлось определение продолжительности и разбивка этого показателя на 10 равновеликих интервалов, а также для каждого из 11 временных значений просчитывалась величина зенитного угла.

Для каждого зенитного угла на основе полного базового алгоритма были рассчитаны интегральная мощность дозы УФ-А + УФ-Б (280–400 нм) и мощности доз биоэффекта эритемы с использованием специально разработанной программы libSpec.exe.

Коэффициент  $K$  рассчитывался как отношение площади под графиком к значению дозы в максимуме, умноженному на 40.

Рассчитанная зависимость для 22 июня и 22 декабря отображена на рисунке 2.

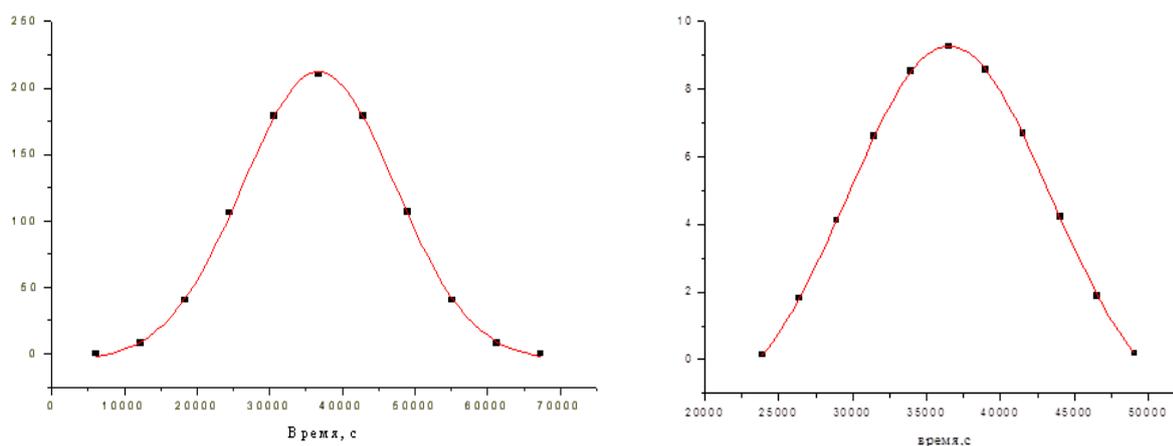


Рисунок 2 – Соотношение мощности эритемной дозы ( $\text{мВт}/\text{м}^2$ ) к времени суток для 22 июня (слева) и 22 декабря (справа)

При этом видно, что максимальное значение коэффициента  $K$  в июне относительно немного смещается по времени.

На рисунке 3 показан расчет коэффициента  $K$  для семи выбранных дней. Ярко прослеживается снижение показателя в более холодные месяцы.

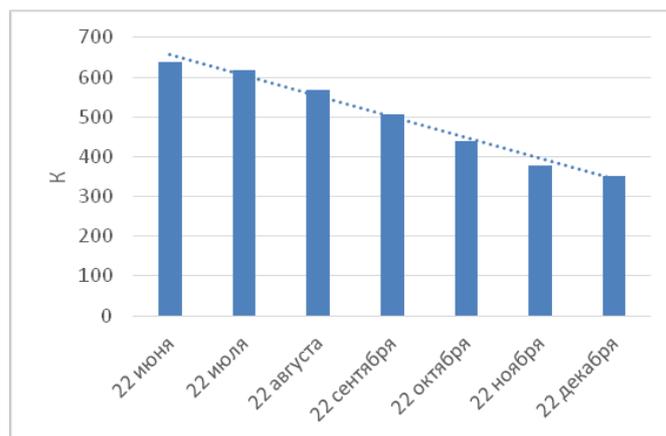


Рисунок 3 – Расчет К для семи выбранных дней по каждому месяцу

При наличии показателей ультрафиолетового индекса в максимуме, с использованием коэффициента К, появляется возможность рассчитывать суточную эритемную дозу, что существенно упрощает процесс и сокращает время проведения расчетов. Для всех основных биологических эффектов солнечного излучения также можно рассчитать схожие коэффициенты.

На рисунке 4 приведено отношение коэффициента К к номеру дня в году с учетом симметрии графика.

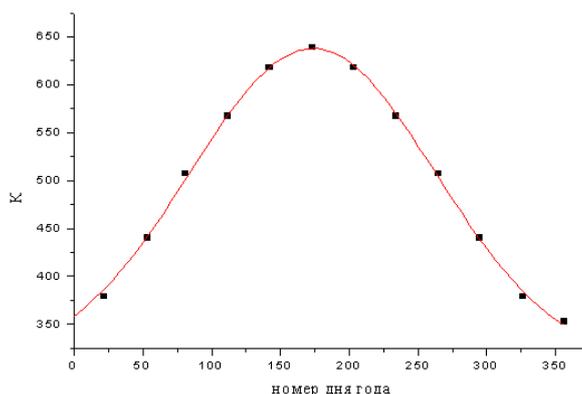


Рисунок 4 – Отношение коэффициента К к номеру дня в году

Выполнен ретроспективный расчет УФ индексов и доз УФ облученности поверхности на оз. Нарочь за 2006 г. и выполнена оценка годовых доз УФ облученности за период 1997–2008 гг. Данные расчетов сопоставлялись с результатами инструментальных наблюдений из архива НИИЦ МО БГУ. В 2006 г. мониторинг приземного излучения проводился на Нарочанской Биологической Станции им. Г.Г. Винберга БГУ с помощью разработанного в НИИЦ МО БГУ ультрафиолетового спектрометра ПИОН-УФ [6]. В автоматическом режиме круглосуточно с интервалом 3 мин. регистрировались спектры распределения спектральной плотности освещенности (СПЭО) поверхности приземным солнечным УФ излучением в диапазоне длин волн 290–450 нм. По спектрам рассчитывались дозы основных биоэффектов и значения УФ индекса. Параллельно определялись значения общего содержания озона в вертикальном столбе атмосферы (ОСО).

Расчет показателей проводился для пункта наблюдения с координатами: 54.9 N, 26.7 E. За варьируемые параметры приняты:

- общее содержание озона в столбе атмосферы (ОСО), ЕД;
- балл облачности (октава по шкале 1–8);
- альbedo подстилающей поверхности (снег, лед, мокрый лед, вода).

Практически во все периоды, за исключением зимних месяцев, использовалось альbedo водной поверхности. По метеорологической дальности видимости производилась оценка аэрозольной составляющей. Данные среднедневного содержания значения ОСО, полученные из архивов наземных измерений НИИЦ МО БГУ и спутниковых систем ОМІ.

Метеорологические параметры для ст. Нарочь получены из архива сайта РУГМЦ [pogoda.by](http://pogoda.by). Выбор 2006 г. обусловлен репрезентативностью полученных данных.

Фактор облачности характеризуется следующими показателями:

- 0 – ясно; 1 – малооблачно (1–2 балла);
- 3 – небольшая облачность (3–4 балла);
- 6 – переменная облачность (5–7 баллов);
- 7 – облачно с прояснениями (8–9 баллов);
- 9 – сплошная облачность (10 баллов).

При расчете проводился пересчет в шкалу октав 1–8.

Также значительными параметрами в модели послужили показатели горизонтальной метеорологической дальности видимости, с целью учета аэрозольного ослабления.

По выбранным параметрам проводился расчет УФ индексов для двух случаев: чистая и облачная атмосфера на время 10:00 GMT. Дополнительно рассчитывались мощности дозы облученности прямым и диффузно рассеянным вниз и вверх излучением Солнца в диапазоне 290–400 нм. Далее по значениям ультрафиолетового излучения выполнялся оценочный расчет дневных доз УФ облученности.

Расчетные максимальные значения УФ индекса  $\geq 8$  согласуются с результатами, полученными экспериментально для Нарочанского региона в другие годы. Возможно, объяснить это можно влиянием более высокого альбеда водной поверхности и более прозрачной атмосферы на рассматриваемой территории по сравнению с Минским мегаполисом.

Следующим этапом было определение годового распределения суточных доз биоэффекта эритема с использованием результатов модельного расчета показателей УФ индекса.

Далее было выполнено интегрирование полученных распределений и рассчитаны суммарные годовые дозы биоэффекта эритема для модели с учетом и без учета влияния облачности. Показатели составили 556 и 434 кДж соответственно.

Следует отметить, что полученные значения хорошо соотносятся со значениями спектрорадиометра ПИОН-УФ при экспериментальном измерении в 2006 г. – 482 кДж.

Полученные результаты позволили провести ретроспективную оценку годовых доз биоэффекта эритемы за период с 1979 по 2008 гг.

Точность ретроспекции существенным образом зависит от возможности использования и точности экспериментальных либо оценочных данных, таких как ОСО, балл облачности, дальность видимости, альбеда и др.

Применение «климатических норм» вместо экспериментальных параметров показало значительное снижение точности ретроспективной оценки (особенно на конкретную дату). Некоторое затруднение вызывает определение «климатические нормы» практически для каждого географического пункта индивидуально из-за пространственной и временной изменчивости параметров.

Ретроспективная оценка суммарных годовых доз эффекта эритемы по результатам численного моделирования представлено на рисунке 5. Выражено изменение показателя и его рост по годам.

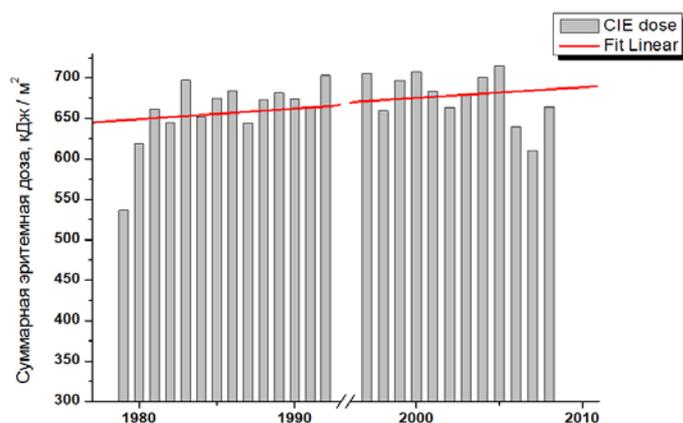


Рисунок 5 – Ретроспективная оценки суммарных годовых доз эффекта эритема по результатам численного моделирования

Появилась возможность провести оценку распределения доз УФ излучения по глубине водоема с использованием результатов численного моделирования и ретроспективной оценки облученности приземным солнечным излучением поверхности водоемов, а также данных об УФ прозрачности водных сред, полученных экспериментально погружаемым фотометром.

Таким образом, проведенные предварительные расчеты показали перспективность подхода и его дальнейшего применения. Целесообразно применять отдельные приложения для улучшения качества расчетов.

*Статья выполнена в рамках ГПНИ «Природные ресурсы и окружающая среда», подпрограммы «Радиация и биологические системы», НИР «Динамика структурно-функционального состояния наземных и водных экосистем в условиях изменения климата и техногенного воздействия»*

## Литература

1. Дорожко, Н. В. Оценка общей и ультрафиолетовой облученности поверхности озер по данным наземных наблюдений, на примере озер Нарочанской группы / Н. В. Дорожко, В. Я. Венчиков, В. С. Демин [и др.] // ActaGeographicaSilesiana. – 2020. – № 14/1 (37). – С. 5–12.

2. Darozhka, N. Simulating irradiance of water layers of natural reservoirs by solar radiation in various spectral ranges [Electronic resource] / N. Darozhka, V. Diomin, I. Bruchkouski [et al.] // EGU General Assembly Conference Abstracts. – Mode of access : <http://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-21899>. – Date of access : 01.06.2020.

3. Красовский, А. Н. Алгоритмы и программное обеспечение для численного моделирования доз облученности водных слоев природных водоемов солнечным излучением различных спектральных диапазонов / А. Н. Красовский, Л. Н. Турышев, А. Г. Светашев [и др.] // Четвертые Виноградовские чтения. Гидрология от познания к мировоззрению : сб. докладов Междунар. науч. конф. памяти выдающегося русского ученого Ю.Б. Виноградова, Санкт-Петербург, 23–31 октября 2020 г. ; под ред. О. М. Макарьевой, А. А. Землянковой. – СПб., 2020. – С. 106–110.

4. Mayer, B. Libradtran [Electronic resource] / B. Mayer, U. Hamann, C. Emde, A. Kylling. – Mode of access : <http://www.libradtran.org>. – Date of access : 05.02.2008.

5. NSF Polar Programs UV Spectroradiometer Network 1995–1997 Operations Report. – Biospherical Instr. Inc., 1998.

6. Турышев, Л. Н. Спектрорадиометр для мониторинга приземного ультрафиолетового солнечного излучения / Л. Н. Турышев, Ю. И. Атрашевский, В. Н. Денисенко [и др.] // Журнал прикладной спектроскопии. – 2005. – Т. 72, № 2. – С. 262–270.