

Том II, с. 501–504

УДК: 530.1

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЕ И ВОДНОЙ СРЕДЕ ПРИРОДНЫХ ВОДОЕМОВ

Л. Н. Турышев, А. С. Светашев, Н. В. Дорожко, Ю. Г. Ермолович

*Национальный научно-исследовательский центр мониторинга озоносферы БГУ, Республика  
Беларусь, г. Минск, ул. Курчатова 7*

*E-mail: turishevl@tut.by; asvetashev@tut.by; natashka\_d10.05@mail.ru; lia93@tut.by.*

**Аннотация.** В работе представлены результаты исследования общей облученности и процессов распространения солнечного УФ излучения в водных средах озер Нарочанской группы.

## NUMERICAL MODELING OF PROPAGATION OF SOLAR RADIATION IN THE EARTH'S ATMOSPHERE AND THE AQUATIC ENVIRONMENT NATURAL WATERS

L. N. Turyshev, A. S. Svetashev, N. V. Dorozhko, Y. G. Ermolovich

**Abstract.** The paper presents the results of a study of the total irradiance and propagation of solar UV radiation in water environments of lakes of the Naroch group.

Особенностью применяемого подхода является сочетание методов численного моделирования с экспериментальным измерением спектров солнечного излучения, достигающих водной поверхности и различных глубинных слоев водоема. Это дает уникальную возможность верификации численной модели.

Измерения биологически активной части приземного солнечного излучения проводились спектрометрическим ПИОН-УФ, разработанным в НИИЦ МО БГУ [1] и предназначенным для регистрации спектральной плотности энергетической освещенности (СПЭО) земной поверхности в диапазоне  $\lambda=290\div 450$  нм.

Исследование уровней облученности различных глубинных водных слоев проводились с помощью погружаемого фотометра [2].

Прибор состоит из двух переносных модулей: погружаемого и надводного. Параллельная работа модулей позволяет измерять мощность солнечного излучения на различных глубинах водоема, а также прозрачность водного слоя (от поверхности до уровня погружения) в спектральном диапазоне 285–400 нм. Дополнительное использование фильтровых насадок позволяет ограничить диапазон биологически активным УФ-Б излучением (285–315 нм).

Кроме озера Нарочь «погружные» измерения проводились также в различных пунктах акватории озер Мястро, Малые Швакшты, Большие Швакшты, Белое и Баторино. Дальности от берега варьировались в пределах  $200\div 2200$  м. Измерения проводились при различных состояниях облачности и волнения водной поверхности. В качестве характеристик «прозрачности» использовались относительные интенсивности излучения, зарегистрированного на различных глубинах, а также «оптические толщины» (отрицательные десятичные логарифмы пропускания) слоев (рис. 1).

«Прозрачность» среды является одной из важных характеристик водоема. Она достаточно устойчива (с учетом сезонных зависимостей) для данного конкретного водоема и является одной из характеристик растворенного вещества. Она косвенно связана с протекающими в водоеме экологическими и биологическими процессами.

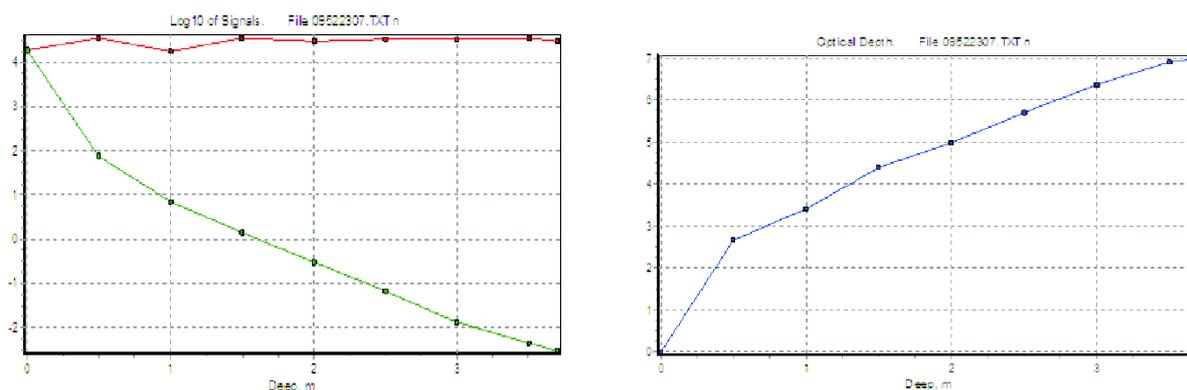


Рис. 1. Логарифмы сигналов (слева) и оптическая толщина водных слоев (справа), регистрируемые надводным и погружаемым модулем прибора PionDEEP в области (285-400 нм).

Определенная экспериментально функция пропускания позволяет сделать качественную оценку интенсивности излучения в различных слоях водной среды при регистрации спектров СПЭО на поверхности водоема.

Усредненные характеристики прозрачности водоемов Нарочанской группы были использованы для предварительной оценки уровней освещенности водной среды по данным, измеренным на уровне водной поверхности. Характеристики прозрачности водных слоев также являются важнейшим параметром в разрабатываемой в НИИЦ МО БГУ методике ретроспективной оценки УФ-климата на территории Нарочанского региона.

Для уточнения параметров численной модели, описывающей распространение приземного солнечного излучения в водных средах с различными оптическими характеристиками, была проведена серия лабораторных измерений функции пропускания образцов природных и модельных водных объектов. Так в летний период вегетационного сезона 2016 года в лабораторных условиях проводилось исследование проб воды, отобранных на озерах Нарочанской группы и ряде природных водоемов Минска и минской области. Были исследованы спектры поглощения природных и модельных водных объектов в спектральном диапазоне  $\lambda = 200 \div 700$  нм.

Для проведения модельных исследований на основе модулей пакета libRadtran 2.0 [3] было разработано программное обеспечение, позволяющее численно моделировать спектры освещенности суммарным (прямым и диффузно рассеянным) солнечным излучением поверхности водоема при различных условиях (зенитный угол, облачность, параметры аэрозолей и т.п.), а также распространение этого излучения в водной среде и освещенности водных слоев на различных глубинах.

Программа объединяет атмосферный и водный модули, которые могут работать отдельно, что позволяет, использовать экспериментально измеренные, например, спектрометрическим ПИОН-УФ, спектры плотности энергетической освещенности (СПЭО) в диапазоне 280  $\div$  450 нм.

Результат такого расчета освещенности на глубине 10 м оз. Нарочь с использованием экспериментального спектра СПЭО, зарегистрированного на поверхности озера, представлен на рисунке 2. В расчете использованы спектры поглощения проб Нарочанской воды.

Разработанная модель позволяет достаточно гибко использовать все доступные оптические параметры атмосферы и водной среды, что позволяет решать различные задачи гидрооптики. С ее помощью была проведена оценка влияния взвешенных органических и неорганических частиц на глубину проникновения в водную среду солнечного излучения в широком спектральном диапазоне, включающем УФ-Б область.

На рисунке 3 представлен результат численного моделирования спектров СПЭО на глубине 10 м при различном содержании взвешенных частиц. Частицы моделировались сферами различ-

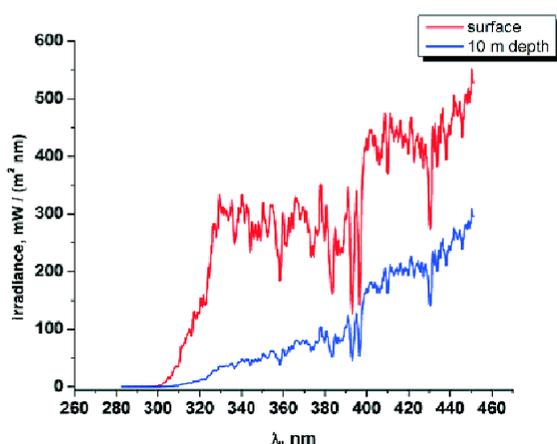


Рис. 2. Численное моделирование спектра СПЭО на глубине 10 м природного водоема по экспериментальному спектру СПЭО, зарегистрированному на поверхности.

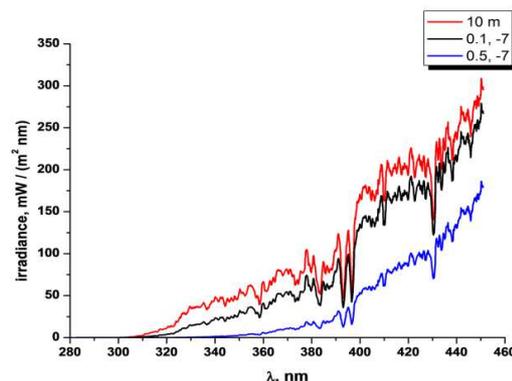


Рис. 3. Спектр на глубине 10 м, спектры с учетом диффузного рассеяния на твердых частицах (модель).

ных радиусов. В использованном варианте модель позволяет кроме радиусов и показателя преломления частиц задавать их концентрации и функции распределения по размерам в отдельных слоях.

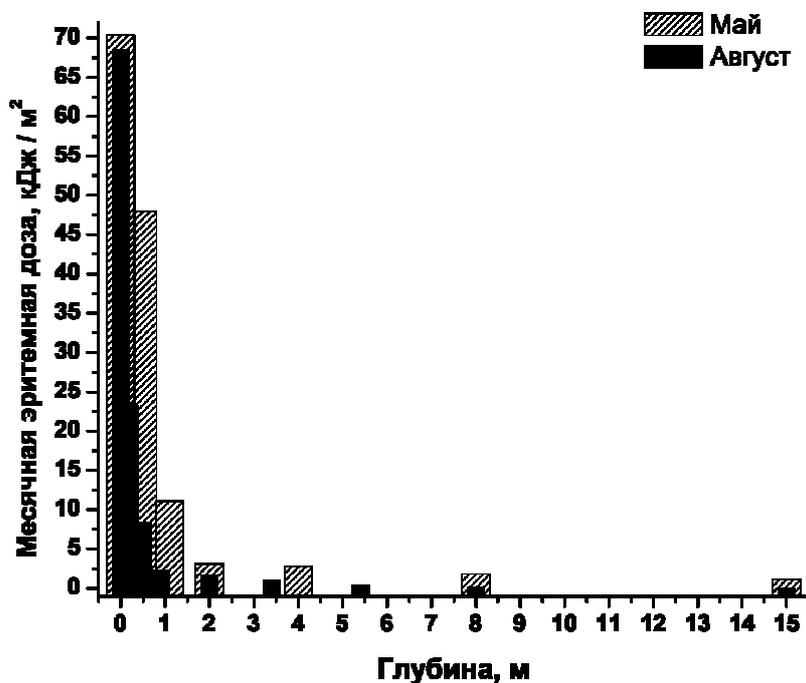


Рис. 4. Распространение солнечного УФ-Б излучения в водной среде оз. Нарочь. Оценка месячных доз биоэффекта эритемы на различных глубинах для мая и августа 2017 г.

На рисунке 4 представлены оценки месячной дозы облученности биологического эффекта эритемы на различных глубинах оз. Нарочь в мае и августе 2017 г. Как видно из рисунка, сол-

нечное излучение УФ-Б диапазона распространяется в водной среде озера до уровней глубины 15 и более метров, причем в мае регистрируется большая прозрачность для УФ излучения, чем в августе. В августе основная доля излучения поглощается поверхностным слоем воды толщиной ~0.5 м.

Показана работоспособность примененного подхода. При доработке модель позволит использовать различные дополнительные характеристики, например форму частиц, либо люминесцирующие свойства среды и т.п. Разработанная комплексная модель атмосферы и водной среды может быть использована для описания процессов распространения лазерных импульсов и различных нелинейных эффектов, возникающих при импульсном дистанционном зондировании.

На основе данной модели разработаны алгоритм и программное обеспечение как для решения «обратных» задач гидрооптики, так и для проведения ретроспективной оценки облученности водных сред природных водоемов.

#### Список литературы

1. Турышев Л. Н., Атрашевский Ю. И., Денисенко В. Н., Тавгин В. Л. Спектрорадиометр для мониторинга приземного ультрафиолетового солнечного излучения // Журнал прикладной спектроскопии. — 2005. — Т. 72, № 2 — С. 262–270.
2. Бюллетень экологического состояния озер Нарочь, Мясстро, Баторино, (2015 год) / Т. В. Жукова [и др.] ; под.общ.ред. д-ра биол. наук Т. М. Михеевой. — Минск: БГУ, 2016. — С. 9–10.
3. Mayer B., Kylling A., Emde C., Namann U., Buras R. libRadtran user's guide. — 2012. — P. 153.