

Наталья В. Дорожко, Виталий Я. Венчиков, Виктор С. Демин,
Александр Г. Светашев, Леонид Н. Турышев

Белорусский государственный университет, Национальный научно-исследовательский центр мониторинга озоносферы, ул. Курчатова 7, 220030 Минск, Беларусь; e-mail: DrozhkoNV@bsu.by; venchikov@yahoo.com; victordm@tut.by; asvetashev@tut.by; turishevln@tut.by

Оценка общей и ультрафиолетовой облученности поверхности озер по данным наземных наблюдений, на примере озер Нарочанской группы

Dorożko N. W., Wienczyk W. Ja., Diemin W. S., Swietaszew A. G., Turyszew L. N. **Ocena całkowitego i ultrafioletowego napromieniowania powierzchni jezior na podstawie obserwacji naziemnych, na przykładzie jezior grupy naroczańskiej.** Przeanalizowano całkowite i ultrafioletowe napromieniowanie powierzchni jezior na podstawie danych z obserwacji naziemnych. Głównymi obiektami badań były jeziora grupy naroczańskiej. Przeprowadzono symulacje numeryczne dawki promieniowania dla regionu mińskiego i naroczańskiego w okresie 2005–2019. W sumie obliczono i przetworzono ponad 100 tys. widm. Przeprowadzono analizę zmienności dziennych, nagromadzonych w danym okresie, miesięcznych i rocznych dawek promieniowaniem słonecznym biologicznie aktywnych zakresów widmowych. Uzyskane dane zostaną wykorzystane do zbadania wpływu promieniowania słonecznego na podstawowe wskaźniki biologiczne i środowiskowe naturalnych zbiorników wodnych.

Dorozhko N. V., Venchikov V. Ya., Demin V. S., Svetashev A. G., Turyshev L. N. **Assessment of the total and ultraviolet irradiation of the lake surface based on ground observations, using the example of the Naroch group of lakes.** The paper analyzes the assessment of total and ultraviolet irradiation of the lake surface based on field observations. The main lakes for observation were those of the Naroch group. A numerical simulation of the radiation dose for the Minsk and Naroch regions for the period 2005–2019 was performed. In total, more than 100 thousand spectra were calculated and processed. The analysis of the variability of daily, accumulated over a certain period, monthly and annual doses of solar irradiation of biologically active spectral ranges was carried out. The obtained data will be used to study the impact of solar radiation on the main biological and environmental indicators of natural reservoirs.

Ключевые слова: излучение, водная среда, ультрафиолетовое излучение, перенос излучения

Słowa kluczowe: promieniowanie, środowisko wodne, promieniowanie ultrafioletowe, przenoszenie promieniowania

Key words: radiation, water environment, ultraviolet radiation, radiation transfer

Аннотация

Представлена оценка общей и ультрафиолетовой облученности поверхности озер по данным наземных наблюдений. Основными озерами для наблюдений являлись озера Нарочанской группы. Проведено численное моделирование доз облученности для Минского и Нарочанского ре-

гионов за период 2005–2019 гг. В общей сложности рассчитано и обработано более 100 тыс. спектров. Проведен анализ variabilityности суточных, накопленных за определенный период, месячных и годовых доз облученности солнечным излучением биологически активных спектральных диапазонов. Полученные данные будут использованы для исследования воздействия

солнечного излучения на основные биологические и экологические показатели природных водоемов.

Введение

Прозрачность водной среды является одним из основных параметров, интегрирующим в себе функциональные особенности озерных экосистем. С этим параметром экосистемы тесно связаны все аспекты биотического круговорота: продукция, трансформация и минерализация органического вещества.

В то же время спектр прозрачности играет важную роль при распределении энергии приземного солнечного излучения между слоями водоема, регулируя как температурный режим, так и воздействие излучения различных спектральных диапазонов на водные биологические системы. Изучение процессов распространения солнечного излучения в водных средах природных и антропогенных водоемов представляет значительный научный и практический интерес при разработке оптических методов контроля их экологического состояния, а также в связи с изучением воздействия электромагнитного излучения различных спектральных диапазонов на водные биологические системы. В первую очередь это относится к излучению „биологически активных“ УФ (ультрафиолетовых) и ФАР диапазонов, поскольку достигающее земной поверхности солнечное УФ-Б и УФ-А излучение, в отличие от ФАР, используемого растениями для фотосинтеза, вызывает целый ряд негативных биологических эффектов (эритема, катаракта, разрушение ДНК, меланома и др.).

В настоящее время мониторинг уровней и доз биологически активного солнечного ультрафиолетового излучения является важной частью глобального экологического мониторинга, который проводится с помощью приборов наземного и орбитального базирования. В это же время, работы, специально посвященные экспериментальному и теоретическому изучению УФ облученности водных сред поверхностных водоемов на различных глубинах, практически отсутствуют.

Основной объем мониторинга приземного УФ излучения проводится наземными системами, обладающими рядом эксплуатационных преимуществ и меньшей погрешностью. Главным недостатком таких систем является локальный характер проводимых измерений. Выходом является разработка и использование программных средств для численного моделирования процессов переноса солнечного излучения в природных средах (MAYER и др., 2014).

Материалы и методы

Оценка общей облученности поверхности озер по данным наземных наблюдений включала:

- анализ данных инструментального мониторинга приземного солнечного излучения на биостанции БГУ им. Г. Г. Винберга;
- численное моделирование спектров и доз облученности поверхности приземным солнечным излучением различных спектральных диапазонов (ВОЛОДИН, ДИАНСКИЙ, 2019).

Инструментальный мониторинг позволяет получать данные локального характера, связанные с атмосферными условиями, непосредственно в пункте наблюдения, в то время как численное моделирование дает возможность проводить анализ данных для всего региона, а также осуществлять ретроспективные и прогнозныe оценки уровней облученности, мощностей и доз биологических эффектов на поверхности и глубинных слоев природных водоемов. Мониторинг включал инструментальные измерения:

- общей облученности поверхности (пиранометр);
- облученности в фотосинтетически активном диапазоне (датчик ФАР) (ТООМИНГ, Гуляев, 1967);
- облученности в биологически активном УФ диапазоне (фотометр ПИОН-Ф) .

Три указанных вида измерений осуществлялись комплексной оптической системой, разработанной в НИИЦ МО БГУ.

Использовались также спектры поглощения проб, отобранных на р. Свислочь сотрудниками Лаборатории гидроэкологии и Учеб-

но-научного центра „Нарочанская биологическая станция им. Г. Г. Винберга“ биологического факультета БГУ.

Некоторые спектральные параметры в озерных экосистемах изменяются согласно трофическому статусу, проявляя количественную зависимость от содержания органического вещества, а другие остаются одинаковыми, что может свидетельствовать о наличии качественной взаимосвязи с параметрами органического вещества водоемов.

Аналогичным образом были использованы исследованные (Отчет по НИР, 2018) спектральные параметры нефилтрованной и филтрованной воды (через фильтры с пористостью 1 мкм) водохранилищ на р. Свислочь и речных участков водотока в пределах г. Минска.

В результате заложены основы построения банка данных, включающих оптические характеристики водных сред природных водоемов

на территории Республики Беларусь. Эта важная работа, начатая под руководством А. П. Остапени (ВИНБЕРГ, 1985; Отчет по НИР, 2018).

Результаты и их обсуждение

Согласно полученным модельным данным в период с 1980 по 2006 год в Нарочанском регионе наблюдался положительный тренд суммарных годовых доз практически всех биоэффектов УФ излучения.

Результат расчета освещенности на различных глубинах оз. Нарочь с использованием экспериментального спектра СПЭО, зарегистрированного на поверхности озера, представлен на рис. 1. В расчете использованы спектры поглощения водных проб, отобранных на различных глубинах оз. Нарочь (ЖУКОВА, МИХЕЕВА, КОВАЛЕВСКАЯ и др., 2016).

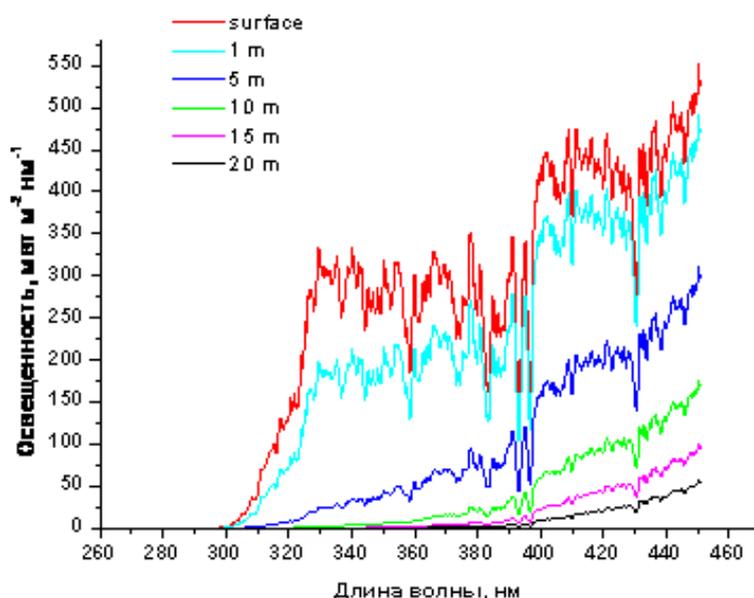


Рис. 1. Моделирование спектра СПЭО на различных глубинах природного водоема типа а3 (оз. Нарочь) по экспериментальному спектру СПЭО, измеренному на поверхности

Rys. 1. Modelowanie spektrum SPE na różnych głębokościach naturalnego zbiornika typu a3 (jez. Narocz) na podstawie eksperymentalnego spektrum SPEO zmierzonego na powierzchni

Fig. 1. Modeling of the SPE spectrum at various depths of a natural reservoir of type a3 (lake Naroch) based on the experimental speo spectrum measured on the surface

Литературные данные и лабораторные исследования спектров ослабления излучения водными пробами оз. Нарочь, позволили от-

нести последнее к типу а3, характерному для большинства озерных систем. Это позволило получить аналитическую зависимость, апро-

ксимирующую спектр коэффициента ослабления водной среды, пропускание водных слоев, а также глубину проникновения излучения различных спектральных диапазонов (рис. 2–4). Получение аппроксимирующих

аналитических выражений позволило существенно сократить расчетные затраты и время счета, что становится весьма существенным при пакетной обработке большого количества спектров.

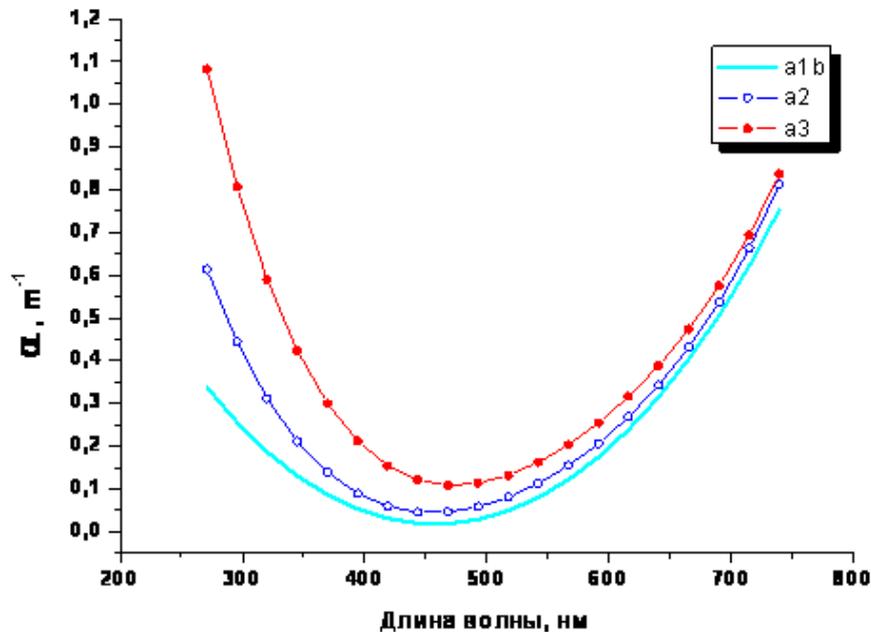


Рис. 2. Спектральная зависимость коэффициента ослабления диффузно рассеянного солнечного излучения водными средами водоемов различных типов
 Rys. 2. Zależność spektralna współczynnika osłabienia dyfuzyjnie rozproszonego promieniowania słonecznego przez wodę w różnych typach zbiorników
 Fig. 2. Spectral dependence of the attenuation coefficient of diffusely scattered solar radiation by water media of various types of reservoirs

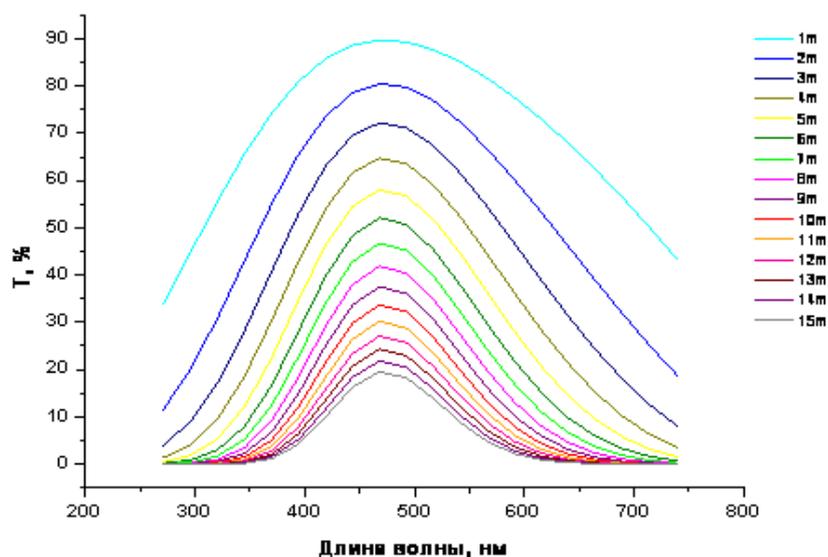


Рис. 3. Спектральная зависимость пропускания диффузно рассеянного солнечного излучения водными средами водоемов типа а3. %СПЭО на глубине водного слоя
 Rys. 3. Spektralna zależność przepuszczania dyfuzyjnie rozproszonego promieniowania słonecznego przez wody zbiorników typu a3. %SPEO na głębokości warstwy wody
 Fig. 3. Spectral dependence of the transmission of diffusely scattered solar radiation by water media of type a3 reservoirs. %Of SPE at the depth of the water layer

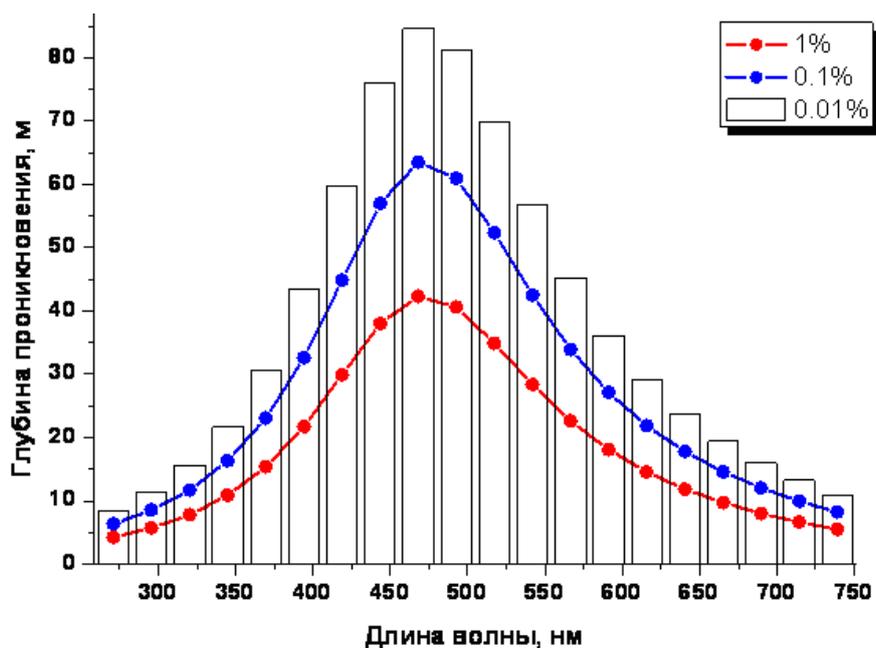


Рис. 4. Глубина проникновения диффузно рассеянного атмосферой солнечного излучения. СПЭО на различных глубинах природного водоема типа а3 (оз. Нарочь) по экспериментальному спектру СПЭО, измеренному на поверхности

Rys. 4. Głębokość przenikania dyfuzyjnie rozproszonego przez atmosferę promieniowania słonecznego. SPEO na różnych głębokościach naturalnego zbiornika typu a3 (jez.Narocz) na podstawie eksperymentalnego spektrum SPEO zmierzonego na powierzchni

Fig. 4. The depth of penetration of diffusely scattered solar radiation by the atmosphere. SPE at various depths of a natural reservoir of type a3 (lake Naroch) based on the experimental speo spectrum measured on the surface

В отличие от случаев с использованием реально измеренных спектров СПЭО, которые представляют собой сумму прямого (dir) и рассеянного вниз атмосферой (dfn) спектров падающего на поверхность солнечного излучения, численное моделирование позволяет учесть все составляющие и отдельно описать их взаимодействие с атмосферой и водной средой.

При этом необходимо учитывать различный характер распространения различных компонент в водной среде и их специфические зависимости от SZA, аэрозолей (частиц в водной среде), облачности и альбедо поверхности.

Пример численного моделирования различных компонент приземного солнечного излучения представлен на рис. 5.

Проведенные исследования показывают, что для лучшего согласия с моделью, необходимость разделять компоненты излучения и при экспериментальных измерениях, что предполагает некоторые изменения в процедуре проведения мониторинга. Особенно важ-

ным это представляется для инструментального мониторинга в УФ области солнечного спектра, где дополнительно проявляется существенная зависимость от общего содержания озона.

С помощью специально разработанной модели (Турьшев и др., 2019) 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.

При проведении расчетов использовались как модельные, так и реальные параметры, характеризующие размеры и пространственное распределение рассеивающих частиц. В качестве реальных параметров использовались литературные данные и результаты, полученные при гидрологическом и спектрофотометрическом анализе водных проб.

На рис. 6 представлен результат численного моделирования спектров СПЭО на глубине 10 м при различном содержании взвешенных частиц. Частицы моделировались сфера-

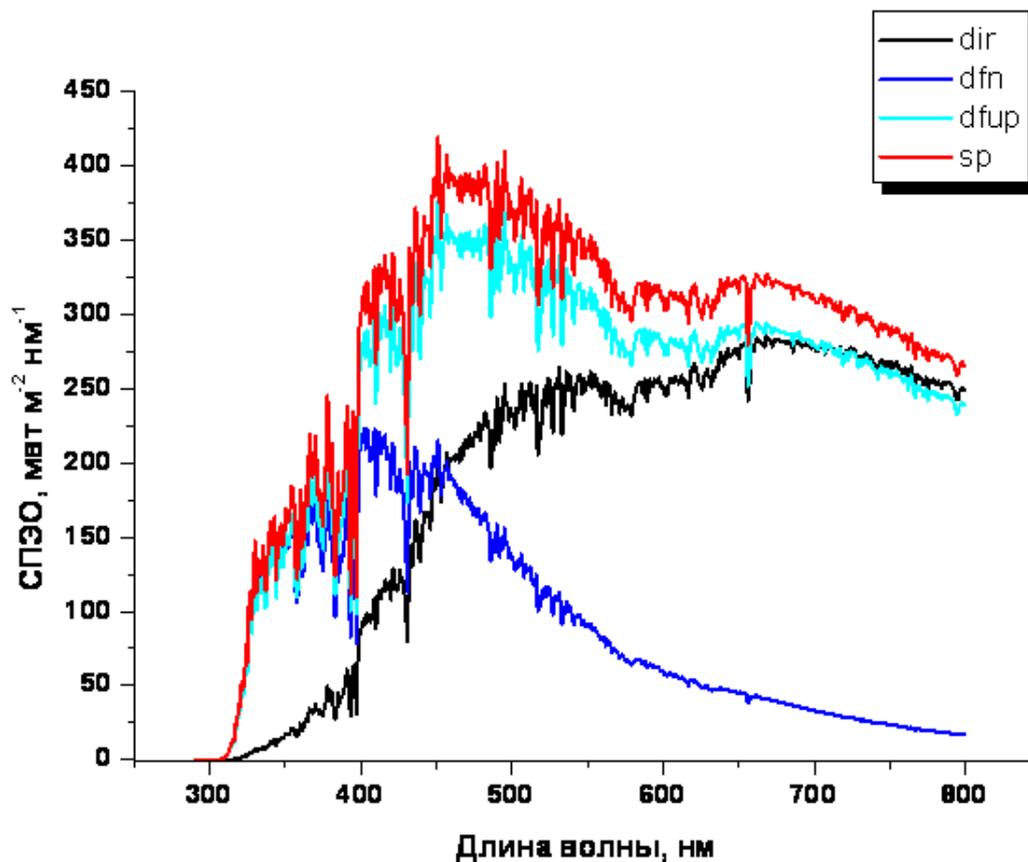


Рис. 5. Спектры компонентов приземного солнечного излучения: dir – прямое, dfn - диффузно рассеянное атмосферой вниз, dfup - диффузно рассеянное атмосферой вверх, sp – суммарное dir + dfn (СПЭО) солнечное излучение

Rys. 5. Spektra komponentów przyziemnego promieniowania słonecznego: dir – bezpośrednio, dfn – dyfuzyjnie rozproszone w dół przez atmosferę, dfup – dyfuzyjnie rozproszone przez atmosferę w górę, sp – sumaryczne promieniowanie słoneczne dir + dfn (SPEO)

Fig. 5. Spectra of surface solar radiation components: dir-direct, dfn-diffusely scattered by the atmosphere down, dfup-diffusely scattered by the atmosphere up, sp-total dir + dfn (SPE) solar radiation

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

При доработке модель позволит использовать различные дополнительные характеристики, например форму частиц, либо люминесцирующие свойства среды и т.п.

В качестве доз освещенности поверхности в УФ диапазоне использовались результаты мониторинга эритемной дозы за 2017–2019 гг. На рис. 7 представлены оценки месячной дозы облученности биологического эффекта эритемы на различных глубинах оз. Нарочь в мае и августе 2017–2019 гг.

При этом предполагалось, что с учетом характерной сезонной изменчивости (ВИНБЕРГ, 1985) прозрачность, в том числе и в УФ области, сохраняется в течение ряда лет, и может служить своеобразной „визитной карточкой” водоема.

Как видно из рисунка, солнечное 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.

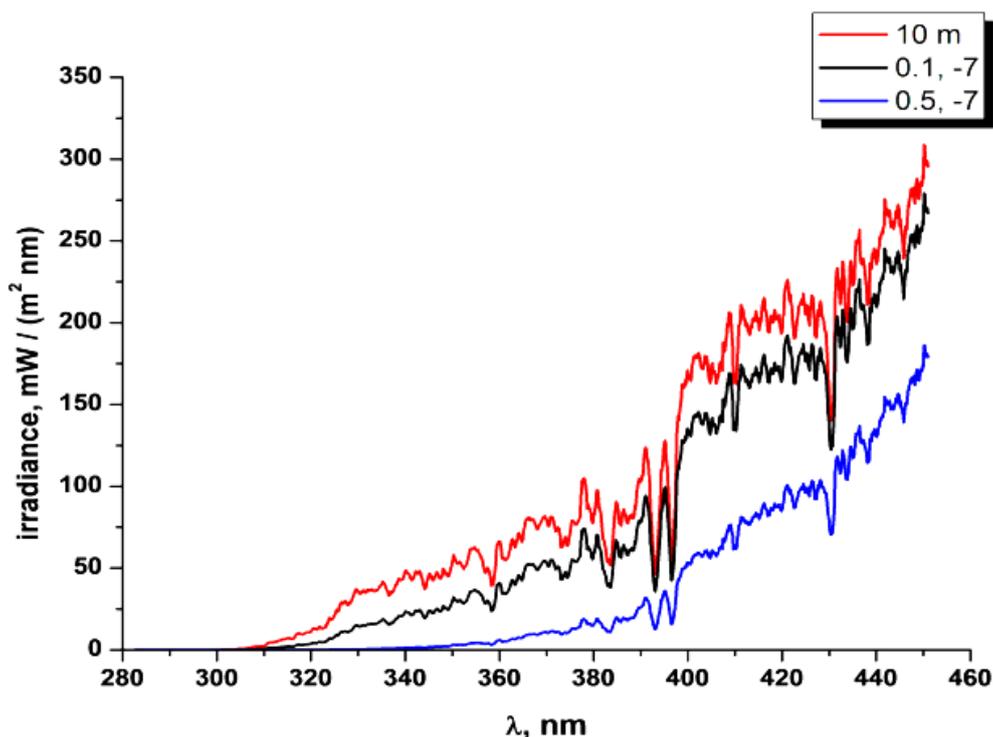


Рис. 6. Спектр СПЭО на глубине 10 м природного водоема типа а3, спектры с учетом диффузного рассеяния на твердых частицах (модель). Результат пересчитан в соответствии с уточненной моделью водной среды

Rys. 6. Spektrum SPEO na głębokości 10 m naturalnego zbiornika typu a3, spektra uwzględniające rozproszenie dyfuzyjne na cząstkach twardych (model). Wynik został przeliczony zgodnie z uściślonym modelem środowiska wodnego

Fig. 6. SPE Spectrum at a depth of 10 m in a natural reservoir of type a3, spectra taking into account diffuse scattering on solid particles (model). The result is recalculated in accordance with the updated model of the water environment

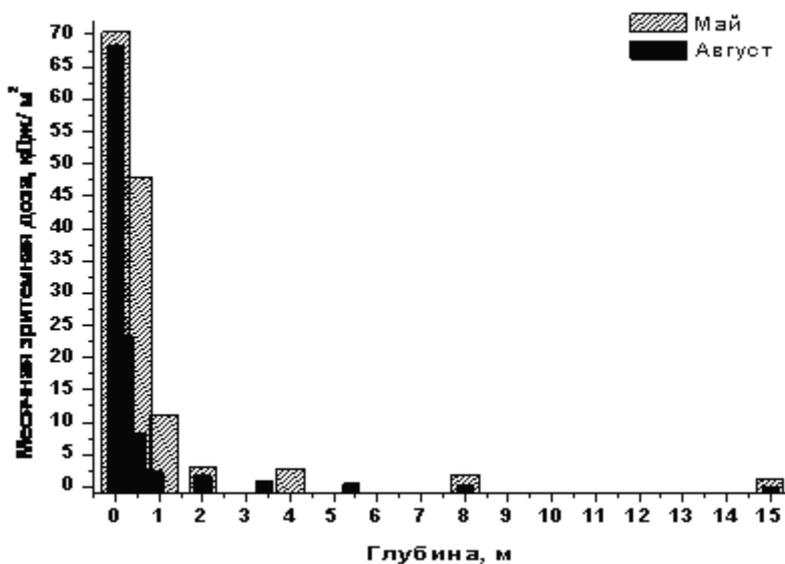


Рис. 7. Распространение солнечного УФ-Б излучения в водной среде оз. Нарочь. Оценка месячных доз биоэффекта эритемы на различных глубинах для мая и августа месяцев 2017–2019 гг.

Rys. 7. Rozprzestrzenienie promieniowania słonecznego UV-B w wodzie jez. Narocz. Ocena dawek miesięcznych bioefektu rumienia na różnych głębokościach w maju i sierpniu w latach 2017–2019

Fig. 7. Propagation of solar UV-B radiation in the water environment of the lake Naroch. Estimation of monthly doses of the erythema bioeffect at various depths for the months of May and August 2017–2019

Заключение

Таким образом включение в алгоритм дополнительных модулей со спектрами действия основных биоэффектов УФ излучения (эритема, катаракта, повреждение ДНК, меланома и др.) позволяет провести ретроспективную оценку суточных, месячных и годовых доз, указанных биоэффектов для различных пунктов на территории Республики Беларусь.

Для глубоких слоев водных систем (озера Нарочанской группы, участки реки Свислочь) также возможен и представляется перспективным расчет доз наиболее важных биоэффектов, таких как ФАР и повреждение ДНК.

Особый интерес будет представлять модельная оценка влияния взвешенных органических и неорганических частиц на глубину проникновения солнечного УФ излучения, а также на результаты орбитальных систем по определению растворенного органического вещества.

Литература

Винберг Г. Г. (ред.), 1985: Экологическая система Нарочанских озер. Изд. „Университетское“, Минск: 302 с.

Володин Е. М., Дианский Н. А., 2019: Моделирование изменений климата в 20–22 столетиях с помощью совместной модели общей циркуляции атмосферы и океана. Известия РАН, Физика атмосферы и океана (в печати).

Жукова Т. В., Михеева Т. М., Ковалевская Р. З. и др., 2016: Бюллетень экологического состояния озер Нарочь, Мясстро, Баторино (2015 год), под общ. ред. Т. М. Михеевой. БГУ, Минск: 100 с.

Отчет по НИР ГПНИ на 2016–2020 гг. „Природопользование и экология“, 10.3 „Радиация и природные системы“: Связь количественных и качественных показателей формирования органического вещества (ов) водохранилищ и нижележащих речных участков водотоков с некоторыми оптическими характеристиками водных объектов. БГУ, Минск, 2018: 63 с.

Тооминг Х. М., Гуляев Б. И., 1967: Методика измерения фотосинтетически активной радиации. Наука, Москва: 144 с.

Турышев Л. Н., Светашев А. Г., Дорожко Н. В., Ермолович Ю. Г., 2019: Численное моделирование процессов распространения солнечного излучения в земной атмосфере и водной среде природных водоемов. Сборник XXVI открытой всероссийской научной конференции „Распространение радиоволн“. Казань, 1–6 июля 2019 г.: 501–505.

Mayer B., Kylling A., Emde C., Hamann U., Buras R., etc., 2014: libRadtran user's guide: 140 p.

Поступила в редакцию: 10 января 2020

Wpłynął do redakcji: 10 stycznia 2020

Received: 10 January 2020