ФИЗИЧЕСКАЯ ГЕОГРАФИЯ И ГЕОЭКОЛОГИЯ

PHYSICAL GEOGRAPHY AND GEOECOLOGY

УДК: 574.5; 577.33/.34; 577.355 https://doi.org/10.5281/zenodo.15497202

Бородко С.К., Дорожко Н.В., Мурашко О.А., Новак Е.И., Светашев А.Г., Сидоркина Е.И., Туболев В.А., Яротов А.Е.

Национальный научно-исследовательский центр мониторинга озоносферы Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь

КОМПЛЕКСНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОБЛУЧЕННОСТИ БИОЛОГИЧЕСКИ АКТИВНЫМ СОЛНЕЧНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ ПОВЕРХНОСТИ И ГЛУБИННЫХ СЛОЕВ ПРИРОДНЫХ ВОДОЕМОВ

Аннотация. *Разработана и применена методика комплексного исследования облученности поверхности и глубинных слоев природных и техногенных водоемов солнечным излучением биологически активных диапазонов. Методика позволяет объединить в рамках общего подхода данные наземных и погружаемых фотометрических систем с результатами численного моделирования атмосферных процессов, процессами переноса солнечного излучения в водных средах, а также данными орбитальных наблюдений. Отмечена перспективность применения разработанного комплекса для оценки биологического и экологического состояния водных объектов, а также проведения ретроспективного анализа и прогноза его изменений при различных сценариях развития регионального УФ климата.*

Ключевые слова: *перенос солнечного излучения, облученность поверхности, ретроспективное моделирование, дозы, биологический эффект, излучение*.

Barodka S.K., Darozhka N.V., Murashka A.A., Novak E. I., Svetashev A.G., Sidorkina E.I., Tubolev V.A., Yarotau A.E.

National Ozone Monitoring and Educational Center of Belarusian State University, Minsk, Belarus

COMPREHENSIVE STUDIES OF IRRADIATION OF BIOLOGICALLY ACTIVE SOLAR RADIATION OF THE SURFACE AND DEEP LAYERS OF NATURAL WATER BODIES

Abstract. *A methodology for a comprehensive study of the irradiation of the surface and deep layers of natural and man-made water bodies by solar radiation of biologically active ranges has been developed and applied. The methodology allows combining, within the framework of a common approach, data from ground-based and submersible photometric systems with the results of numerical modeling of atmospheric processes, processes of solar radiation transfer in water environments, and data from orbital observations. The prospects for using the developed complex for assessing the biological and ecological state of water bodies, as well as for conducting retrospective analysis and forecasting its changes under various scenarios for the development of regional UV climate are noted.*

Key words: *solar radiation transfer, surface irradiation, retrospective modeling, doses, biological effect, radiation.*

Введение и постановка проблемы. Процессы распространения солнечного излучения в водных средах природных и антропогенных водоемов играют важную роль в их био и экогенезе. Они представляют значительный научный и практический интерес при разработке оптических методов контроля биологического и экологического

состояния водоемов, а также в связи с изучением воздействия электромагнитного излучения различных спектральных диапазонов на водные биологические системы.

Весьма актуальны экспериментальные и теоретические исследования в «биологически активных» УФ и ФАР диапазонах, 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.).

При изучении биологических и экологических процессов в природных водоемах озерного типа различной трофности особый интерес представляет экспериментальное исследование и численное моделирование водных систем с ярко выраженными пространственными неоднородностями оптических характеристик.

В этой связи перспективной является разработка погружаемых приборов пассивного и активного (флуоресцентного) типа, позволяющих исследовать неоднородности распределения физических параметров среды in situ, а также разработка численных моделей, позволяющих моделировать свойства оптических сред сложного неоднородного состава.

Применение численных моделей позволяет, с одной стороны, исследовать влияние параметров атмосферы на спектры УФ освещенности поверхности и глубинных слоев водных систем, а, с другой стороны, распространять данные локального мониторинга на значительные пространственные области.

Это особенно актуально в труднодоступных регионах с недостаточно плотной сетью локальных пунктов наблюдения и сложными условиями проведения погружных измерений.

Кроме того, формат получаемых численных данных позволяет адекватно сопоставлять их с данными орбитальных наблюдений с целью валидации климатических и экологических моделей.

Необходимо также отметить, что вследствие сложности и специфичности необходимого оборудования, работы, специально посвященные экспериментальному изучению УФ облученности водных сред и сопоставлению результатов с другими биологически значимыми параметрами поверхностных водоемов на различных глубинах, практически отсутствуют.

В настоящей работе представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований спектров приземного солнечного излучения, спектральных характеристик прозрачности водных систем, а также разработки базовых алгоритмов и программного обеспечения для численного моделирования процессов переноса солнечного УФ излучения в атмосфере и водных средах природных водоемов.

Изученность вопроса. Ультрафиолетовое излучение составляет около 5 % от всего потока солнечного излучения, достигающего земной атмосферы, на долю видимого и инфракрасного диапазонов приходится, соответственно, 39 % и 56 % [12].

Тем не менее, наряду с экологическими проблемами, обусловленными глобальным изменением климата, а также с общим ухудшением экологической обстановки (антропогенным загрязнением атмосферы, водной среды и др.), в последние десятилетия, обозначилась проблема вредного влияния избыточных уровней приземного УФ излучения на здоровье человека и состояние биосферы.

С избыточным влиянием УФ излучения Всемирная организация здравоохранения связывает более 25 заболеваний и нарушений состояний здоровья человека. Наиболее опасными для здоровья и жизни человека являются провоцируемые УФ излучением базальноклеточный и плоскоклеточный раки кожи и особенно злокачественная меланома. Избыток биологически активного УФ облучения негативно влияет также на состояние природных эко- и биосистем.

Вследствие этого мониторинг уровней и доз биологически активного солнечного УФ излучения является важной частью глобального экологического мониторинга, который проводится с помощью приборов наземного и орбитального базирования.

Наиболее полно современное состояние исследований воздействия приземного солнечного излучения УФ диапазонов на здоровье человека, биологические и экологические системы представлено в фундаментальном обзоре Zerefos C., et al [25].

Процессы переноса солнечного излучения в водных средах природных водоемов рассматриваются в значительном количестве работ, среди которых можно отметить монографии [10, 2].

Поиску связи интенсивности солнечного излучения с процессами образования первичной продукции морских биосистем посвящен ряд научных и диссертационных работ [6, 7].

Тем не менее, в литературе отсутствуют результаты экспериментальных исследований распространения в водной среде излучения УФ диапазонов, а также их воздействия на водные биосистемы.

Цель и задачи работы. Цель исследования состоит в том, чтобы разработать методику комплексного исследования оптических характеристик водных экосистем различной трофности. Методика должна включать экспериментальные данные наземных и орбитальных измерений, а также результаты численного моделирования облученности поверхности и глубинных слоев водных объектов приземным солнечным излучением биологически активных диапазонов (УФ-А, УФ-Б, ФАР) в условиях реальной атмосферы.

Материалы и методы. В работе использованы данные мониторинга уровней приземного солнечного излучения на Минской озонометрической станции (№354) ННИЦ МО БГУ (53.83°N, 27.47°E), в Учебно-научном центре «Нарочанская биологическая станция» имени Г.Г. Винберга (53.89°N, 27.55°E) и в Гомельском государственном университете имени Франциска Скорины (52.44°N, 31.00°E). Использованы также результаты исследования оптических характеристик водной среды озер Нарочанского региона с использованием погружных систем, разработанных в ННИЦ МО БГУ.

Представленный вариант методики численного моделирования спектров энергетической освещенности приземным солнечным излучением, а также мощностей и дневных доз, основных биоэффектов разработан на базе программного пакета libRadtran 2.0 [21, 17].

Прогнозная оценка параметров облачности для использования в модели проводилась с помощью расчетов в мезомасштабной модели WRF [23].

Для оперативного определения параметров подстилающей поверхности и валидации атмосферного блока разработанной модели использовались данные орбитальных систем AURA OMI, AURA OMPS, GOME [20].

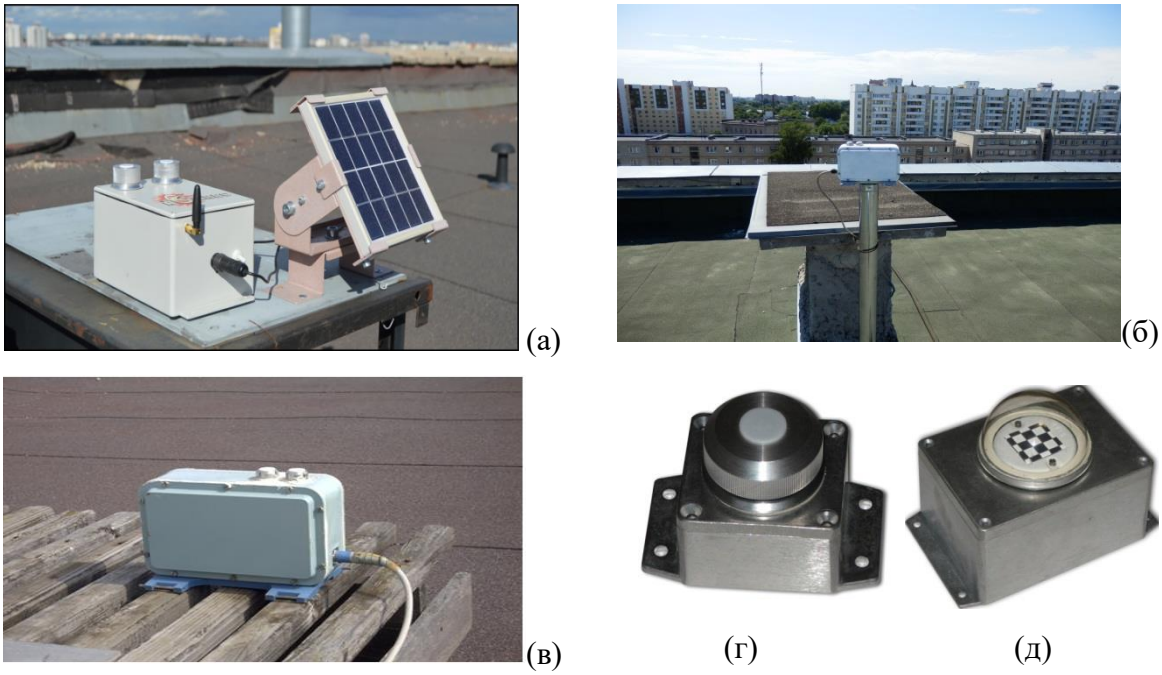
Обработка результатов проводилась с помощью разработанного оригинального программного обеспечения, а также с использованием пакетов MatLab [18] и Origin [24].

Результаты и обсуждение. В ННИЦ МО БГУ в течение ряда лет разрабатываются приборы и методы исследования уровней облученности и спектров приземного солнечного излучения, включая распределение энергии солнечного излучения в водных средах [13, 14, 3, 15, 8, 16].

Пункты наблюдения в Минске и Гомеле оснащены двухканальными фильтровыми фотометрами «ПИОН-Ф» (Рис. 1, а и б). На Нарочанской биологической станции установлена модификация фотометра «ПИОН - ФАР» (Рис. 1 в). Прибор оснащен дополнительными датчиками: регистратором фотосинтетически активной радиации (ФАР) и пиранометром для оценки общей облученности (Рис. 1, г и д).

Все приборы включены в озонометрическую сеть ННИЦ МО БГУ и периодически проходят процедуру сравнения и калибровки на Минской озонометрической станции ННИЦ МО БГУ.

Измерения ОСО проводятся в рамках специально разработанной методики с использованием интегральных спектров освещенности, регистрируемых каналами фотометров. Разработаны также тестовые варианты программ для определения вертикальных профилей распределения ОСО.



(а) (б) (в) (г) (д)

Рис. 1. Сетевые двухканальные фильтровые приборы ПИОН-Ф: (а) – на Минской озонометрической станции, (б) – в Гомельском университете им. Ф. Скорины, (в) – на Нарочанской биологической станции им. Г.Г. Винберга, (г) – фотометрическая головка измерителя ФАР, (д) – головка пиранометра для измерения общей облученности в оптическом диапазоне.

Кроме мониторинга ОСО приборы предназначены также для мониторинга уровней биологически активного ультрафиолетового излучения. Сигналы коротковолновых каналов фотометров, после дополнительной калибровки используются для измерения значений мощности дозы биологического эффекта «эритема», на основании которых определяется стандартное и максимальное значение УФ индекса. Интегрирование мощностей доз, зарегистрированных в течение светового дня, используется для определения энергетических доз различных биоэффектов.

При непосредственном участии авторов работы разработаны погружные приборы линейки ПИОН-АКВА (Рис. 2), а также базовая модель для численных расчетов освещенности поверхности и глубинных слоев природных водоемов солнечным излучением биологически активных диапазонов [14, 3, 15, 8, 16].

Вариант численной модели, использованный в настоящей работе, предназначен для решения «прямой задачи» оптики атмосферы – расчета спектров солнечного излучения и мощностей доз облученности основных биоэффектов на поверхности и в глубинных слоях водоемов при различных состояниях атмосферы и водной среды.

При разработке специальный акцент был сделан на численном моделировании водных сред водоемов различной трофности. Для этого с целью повышения гибкости и возможности быстрой адаптации к виду решаемой задачи в модели предусмотрены два

автономных блока атмосферный и водный, а также переходный блок учета характеристик водной поверхности.

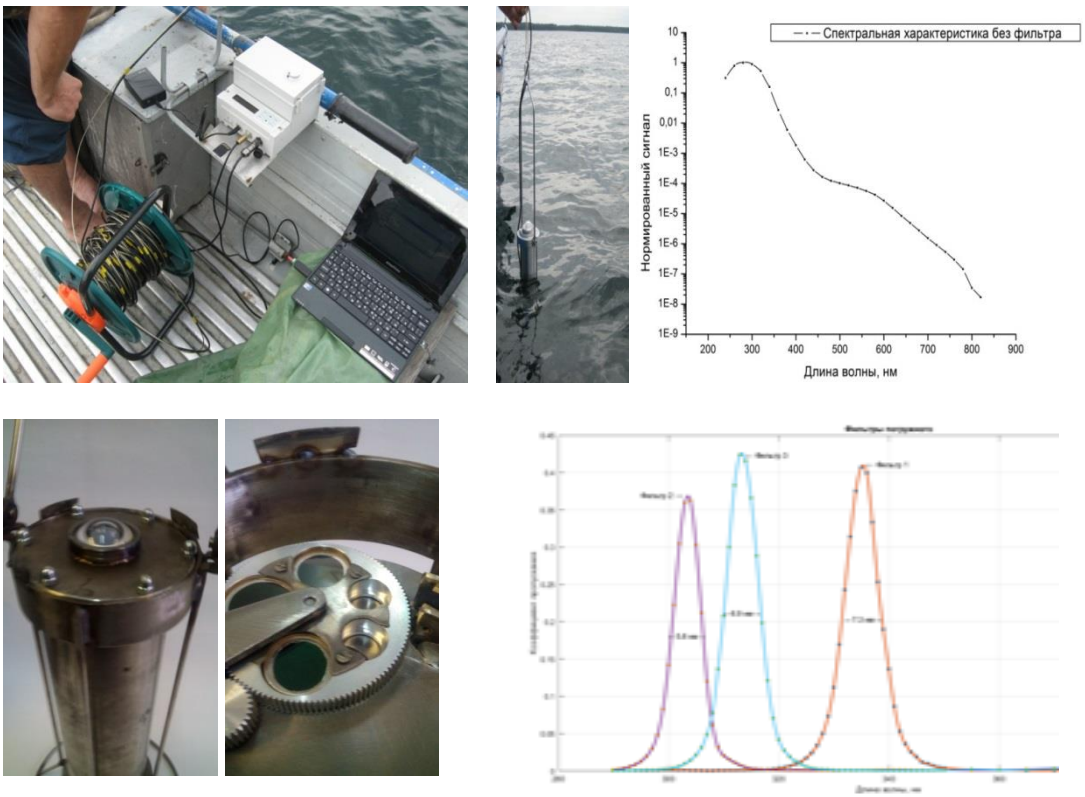


Рис. 2. Погружные системы ПИОН-АКВА и спектры чувствительности их входных каналов: вариант 2010 г. с отдельным надводным модулем (вверху); вариант 2019 г. с револьверной системой переключения фильтров

Атмосферный блок модели предназначен для численного моделирования спектров СПЭО, СПЭЯ приземного солнечного излучения на земной и водной поверхности при различных зенитных углах Солнца (SZA) и практически при любом состоянии атмосферы, включая характеристики малых газовых составляющих, аэрозолей и облачности. При этом варьируемыми параметрами могут быть также альбедо поверхности и высота точки наблюдения над (под) уровнем моря. При расчетах учитывается также сферичность земной поверхности, что существенно при больших значениях SZA.

Промежуточный блок модели использует спектры, рассчитанные атмосферным блоком, которые поступают на вход промежуточного блока, описывающего состояние водной поверхности.

Промежуточный блок учитывает изменения абсолютных значений и спектральной зависимости альбедо водной поверхности для прямого и диффузно рассеянного атмосферой солнечного излучения при различной степени волнения водоема. Возможен также учет наличия пены и тонких органических пленок.

Водный блок использует **с**пектр падающего солнечного излучения, преобразованный поверхностным блоком. Водный блок разработан для моделирования процессов переноса солнечного излучения в водной среде.

Основные преимущества разработанной модульной структуры заключается в том, что модули при необходимости могут работать автономно. Так, например, при наличии экспериментального спектра освещенности водной поверхности, полученного при регистрации наземными приборами, можно проводить расчет, не используя

атмосферный блок, а передавая этот спектр непосредственно на вход переходного, либо сразу водного блока.

В разработанном варианте модели существенно расширен спектральный диапазон атмосферного блока, предоставлена возможность работы с отдельными диапазонами солнечного спектра, что позволяет сократить объем и время проведения расчетов при решении специфических задач для каждого из биологически активных диапазонов (УФ-Б, УФ-А, ФАР), либо их комбинаций. Уменьшение ресурсоемкости важно при пакетной обработке большого количества файлов. Предусмотрено также выделение диапазонов, соответствующих известным приборам орбитального базирования, например, AVHRR [19].

Для основных блоков разработаны отдельные интерактивные и скриптовые приложения. Разработаны также приложения для предварительной обработки входной информации, поступающей от наземных и орбитальных приборов. Разработана форма файлов для обмена информацией между блоками, а также для дальнейшей статистической обработки и визуализации полученных результатов.

Наряду с базовым программным блоком, решающим уравнения переноса солнечного излучения в атмосфере и водной среде дискретно-ординатным методом (DISORT) [21], разработан модуль, реализующий метод Монте-Карло [18]

При разработке переходного (поверхностного) блока модели предусмотрен модуль, позволяющий в зависимости от значения солнечного зенитного угла (SZA) разделить экспериментальный суммарный спектр СПЭО на составляющие прямого (dir) и рассеянного вниз атмосферой диффузного (dn) солнечного излучения. Это позволяет моделировать распространение этих составляющих в водном блоке по отдельности, и на выходе суммировать полученные результаты.

В данном варианте при расчете спектров СПЭО прямое и диффузно рассеянное атмосферой солнечное излучение моделируются отдельно. Это дало возможность в переходном блоке модели отдельно рассчитывать их перенос через водную поверхность. Такой подход особенно важен в весенне-летний период, когда при ясной погоде значительно преобладает освещенность водной среды прямым солнечным излучением.

Методика позволяет проводить как оперативные, так и ретроспективные или прогнозные исследования УФ облученности для локальных пунктов водной поверхности и может быть использована для исследования значительных территорий и позволяет проводить валидацию по спутниковым данным.

Результаты применения упрощенного варианта разработанной методики для ретроспективного моделирования и анализа годовых доз основных биоэффектов на территории Республики Беларусь представлены в работе [4]. В этой работе был выполнен ретроспективный расчет УФ индексов и доз УФ облученности поверхности оз. Нарочь за 2006 г. и выполнена оценка годовых доз УФ облученности за период 1997–2008 гг. [24].

Сопоставление данных расчета с результатами инструментальных наблюдений из архива ННИЦ МО БГУ и показали перспективность использованного подхода для климатологической и экологической оценки состояния водных систем [5].

Кроме ретроанализа, были проведены также тестовые исследования по применению атмосферного блока разработанной модели для прогноза приземной УФ облученности. Прогноз УФ облученности потребовал разработки дополнительных средств по использованию данных наземных и орбитальных наблюдений.

Прогнозирование УФ индекса проводилось с использованием разработанного в ННИЦ МО БГУ варианта системы краткосрочного прогноза УФ индекса (и других биологических эффектов приземного солнечного УФ излучения) с периодом заблаговременности до 3 суток.

В основу системы прогноза УФ индекса (и других биологических эффектов приземного солнечного УФ излучения) с периодом заблаговременности до 3 суток

положена обнаруженная корреляционная зависимость между значениями приземной температуры и общим содержанием ОСО (регрессионная модель) [9], особенно ярко выраженная в периоды устойчивой летней и зимней атмосферы (см. Рис. 3). Обнаруженная зависимость несколько ослабевает в периоды перестройки атмосферы (весна, осень).

На рис. 3 приведены результаты для г. Минска. Апробация модели для других регионов Беларуси, включая области основных озерных систем, дала схожие результаты.

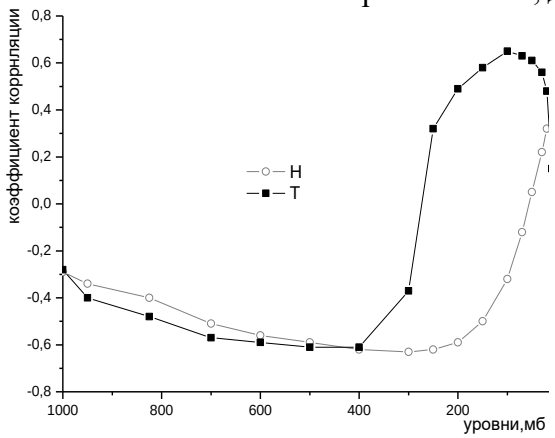


Рис. 3. Средние значения коэффициентов корреляции между вариациями ОСО и вариациями метеопараметров — температурами (Т), высотами (Н) стандартных изобарических поверхностей [9]

Таким образом, система краткосрочного прогноза УФ облученности основана на данных наземного мониторинга ОСО, температуры воздуха и облачности с включением, для повышения заблаговременности, результатов траекторного анализа движения озоновых аномалий в атмосфере над территорией Республики Беларусь.

В результате проведенных исследований показано, что для расчета коэффициентов регресии могут быть использованы данные реанализа NCEP/ NCAR с учетом небольших различий, связанных с температурными инверсиями в приземном слое. Траекторный анализ перемещения озоновых аномалий проводился по данным орбитальных наблюдений приборами AURA-OMI, AURA-OMPS и GOME [20]. Для автоматизированного анализа орбитальных данных разработана специальная программа парсинга сайтов с открытым доступом и анализа изображений методами машинного обучения (см. рис. 4).

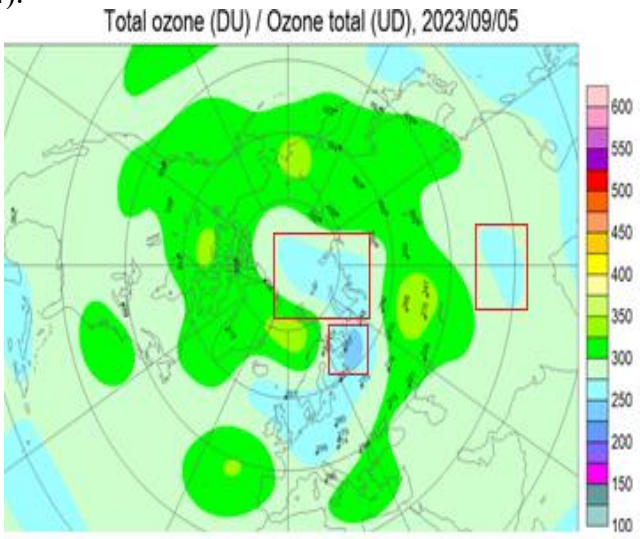


Рис. 4. Пример работы алгоритма обнаружения и локализации отрицательных озоновых аномалий по данным GOME [20]

Облачность один из самых сложных элементов прогноза. Синоптический метод дает параметры облачности на конкретный момент времени, но не предсказывает количественно параметры облачности, необходимые для модельных расчетов.

Спутники также дают параметры облачности «оперативно» – на момент съемки, с интервалами ~1,5 часа (примерное время одного оборота метеоспутника). Это позволяет проводить прогноз только в краткосрочном режиме nowcasting.

В качестве одного из возможных вариантов прогноза облачности в работе рассматривался вариант численного расчета локальной облачности в системе WRF [23].

Такой расчет, основанный на данных прогноза какой-либо глобальной модели, например, GFS (The Global Forecast System) [23], позволяет проводить прогнозные расчеты с заблаговременностью до 300 часов и пространственным разрешением $\Delta x \sim 1 \div 3$ км.

Для моделирования спектров СПЭО из результатов расчета в системе WRF использовалась информация о типе облачности, толщине и высоте слоя, полученная из вертикальных разрезов модельной атмосферы над исследуемым пунктом наблюдения.

На Рис 5. В качестве примера представлен вариант использования параметров водных (водосодержащих) облаков нижнего яруса среднего развития.

На вертикальном разрезе слоя атмосферы (Рис. 5, слева) обозначена линия температуры 0°С на высоте ~3 км. Интересно, что облака формируются не только выше, но и значительно ниже этой линии, что свидетельствует о высоком содержании влаги, концентрация которой растет к центру облачного массива от периферии. Видна также тенденция вертикального развития облачности.

На рис. 5 (справа) представлена схема облачности для моделирования спектров в пакете LibRadtran, сформированная алгоритмом обработки результатов расчета модели WRF.

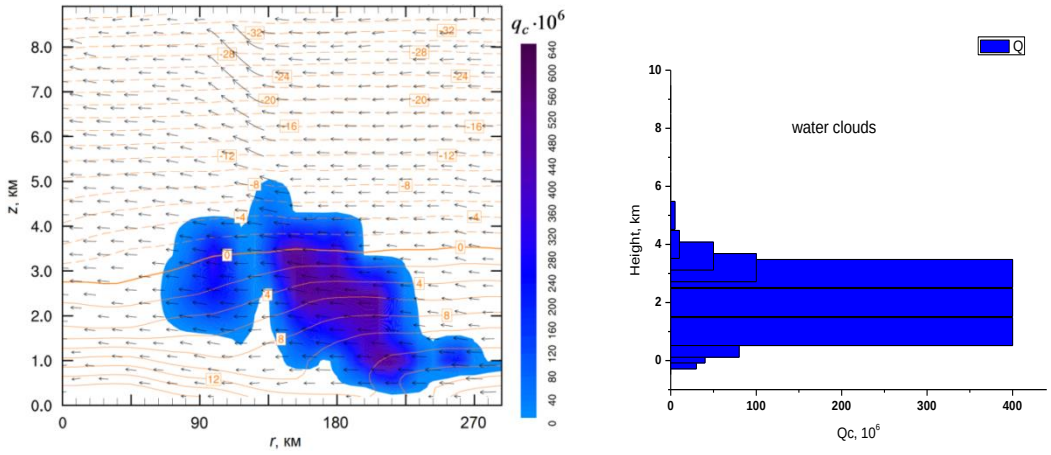


Рис. 5. Вертикальный разрез слоя водной облачности: расчет WRF (слева), соответствующая высотная схема облачности для пакета libRadtran (справа)

С целью сокращения объема вычислений, предложен вариант сочетания расчета WRF с предварительным обнаружением методами машинного обучения (Machine Learning, ML) характерной облачности в заданном регионе по данным спутниковых наблюдений. Такой алгоритм хорошо поддается автоматизации и позволяет обеспечить прогноз облачности с заблаговременностью до 3-х суток.

Благодаря комплексному использованию моделей WRF и LibRadtran, а также разработанных программ парсинга и распознавания спутниковых снимков, удалось автоматизировать процесс прогноза УФ облученности и значительно снизить вычислительные затраты, необходимые для его реализации.

Моделирование облученности водных слоев озерных объектов различной трофности проводилось на примере озер Нарочанской группы. Для этого были использованы результаты лабораторных исследований прозрачности водных проб, отобранных на различных глубинах, а также экспериментальные данные, полученные с помощью погружаемых систем ПИОН-АКВА в течение весенне-осенних сезонов 2017 - 2020 гг.

На рис. 6 показаны основные пункты отбора проб и проведения погружных измерений.

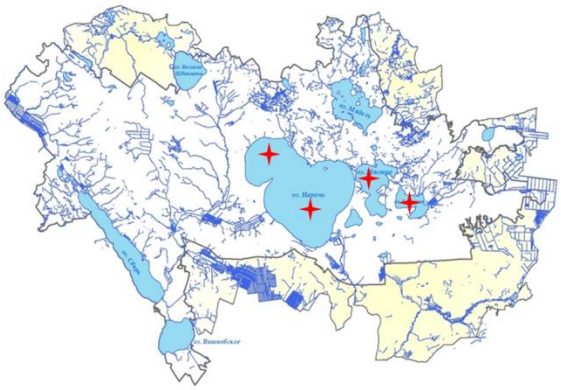


Рис. 6. Схема расположения точек отбора проб в озерах НП «Нарочанский» [5, 11]

Экспериментальные данные о прозрачности водных сред озер Нарочанской группы были получены с помощью погружаемого фотометра ПИОН-АКВА, сконструированного в ННИЦ МО БГУ в 2010 г. (Рис. 2, сверху). Прибор состоит из погружаемого и надводного модулей, что 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. Фильтровые насадки позволяют проводить измерения в биологически активном диапазоне УФ-Б (285–315 нм).

Погружные измерения проводились на оз. Нарочь, а также в различных пунктах акватории озер Мястро, Малые Швакшты, Большие Швакшты, Белое и Баторино [5]. Расстояние от берега варьировалось в пределах 200÷2200 м. Измерения проводились при различных состояниях облачности и волнения водной поверхности. В качестве характеристик прозрачности использовалась относительная интенсивность излучения, зарегистрированного на различных глубинах, а также «оптические толщины» (отрицательные десятичные логарифмы пропускания) слоев [5].

В настоящей работе особое внимание уделялось исследованию неоднородности поля освещенности солнечным УФ излучением в водных слоях природных водоемов различной трофности. Этот вопрос особенно важен для анализа состояния водных речных и озерных систем с сезонным развитием фитопланктона.

Исследования показали, что разработанная модель при использовании оперативных экспериментальных данных погружных систем в состоянии моделировать спектры и освещенности в средах с высокой степенью пространственной неоднородности оптических характеристик по вертикали.

Для исследованных водоемов озерного типа Нарочанской группы проведена оценка сезонных измерений глубины фотической зоны для излучения УФ-Б и УФ-А диапазонов. Показано, что в данных водных системах основная доля УФ излучения поглощается в слое ~2 м (март – июнь), который сокращается до 1÷2 см в период активной вегетации (июль – август).

На рис. 7 эти данные сопоставлены с результатами оценки вертикальных профилей распределения первичной продукции и деструкции в озере Нарочь.

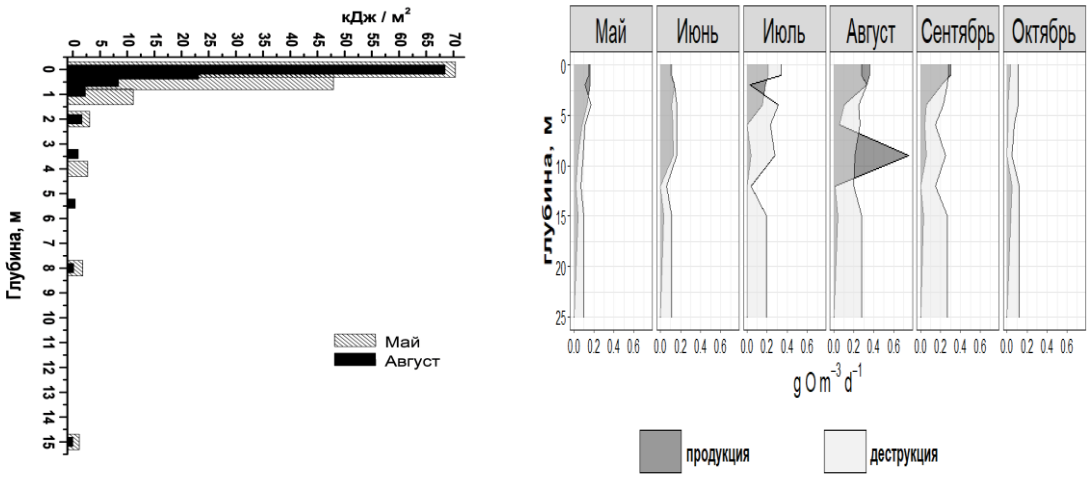


Рис. 7. Вертикальное распределение месячных доз УФ-Б облученности водных слоев (слева) [5], а также первичной продукции и деструкции планктона (справа) в водной среде оз. Нарочь

Данные на рис. 6 косвенно подтверждают ранее высказанное мнение о том, что повышенные дозы УФ излучения угнетающе действуют на развитие планктона.

Из качественного сравнения соответствующих профилей можно сделать предположение, что повышенные дозы УФ излучения в поверхностном слое воды сдерживают там развитие планктона. В августе УФ излучение концентрируется у поверхности, а максимум продукции планктона сдвигается на глубину ~10 м.

Тем не менее, данный вопрос требует дальнейшего более подробного исследования. Он выходит за рамки физико-географического рассмотрения данной работы. Рассмотрению и анализу биологических аспектов будет посвящена специальная работа.

Базовые дискретно-ординатные методы решения задачи переноса солнечного излучения в природных средах ограничены моделью плоских оптически однородных слоев. С их помощью можно исследовать неоднородность водной среды по вертикали, но задачи для природных водоемов сложного состава, с наличием большого числа локальных включений различного типа (водорослей, полей твердых взвесей, областей с повышенным содержанием растворенного хлорофилла и органических пигментов и др.) исследованию этими методами практически не поддаются.

В этой связи для моделирования трехмерных полей освещенности глубинных слоев природных водоемов разработанная модель дополнена модулем, реализующим метод Монте-Карло [11]. Использованная модель Монте-Карло реализует метод прямой трассировки фотонов (forward tracing). В дополнение к трехмерным средам он позволяет реалистично обрабатывать неоднородное поверхностное альбедо и топографию. В нашем случае это дает возможность моделировать характеристики и рельеф шельфа или дна водоема.

Проведенные численные эксперименты показали, что в однородных средах метод Монте-Карло и стандартный дискретно-ординатный метод с учетом многократного рассеяния дают примерно одинаковые результаты.

В то же время показано, что при моделировании освещенности значительных площадей поверхности (водоема) метод Монте-Карло начинает получать преимущество перед необходимостью многократно «запускать» локальный дискретно-ординатный код.

После анализа проведенных численных экспериментов был сделан вывод о целесообразности комбинирования методов расчета спектров СПЭО, используя алгоритм метода Монте-Карло только для отдельных слоев с ярко выраженной неоднородностью. При этом, перенос излучения в значительно большей по объему более однородной части водоема вполне успешно может быть рассчитан в рамках дискретно - ординатного метода, такого, как, например, DISORT из пакета LibRadtran 2.0 [21].

Перспективным оказалось использование предварительных расчетов, проведенных дискретно-ординатными методами, для определения диапазона длин волн и примерного количества фотонов, которые необходимо использовать для моделирования освещенности слоев на определенных глубинах.

Рис. 8 воспроизводит результат расчета спектров СПЭО на различных глубинах водной среды, на котором выделен диапазон длин волн для моделирования освещенности методом Монте-Карло на глубине 30 м.

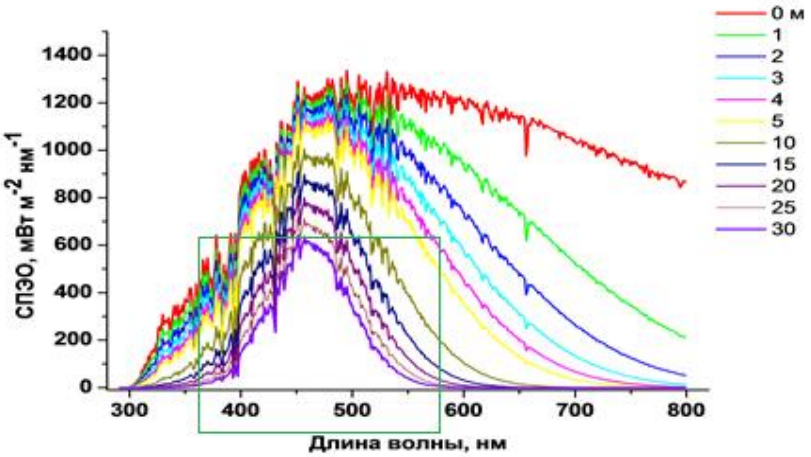


Рис. 8. Выбор диапазона длин волн и оценка числа фотонов, необходимых для моделирования освещенности слоя на глубине 30 м

Как видно из рис. 8, данной глубины достигают только фотоны с длинами волн в диапазоне ~350÷580 нм. Максимум энергии выделенного спектра ~ 600 мвт м$^{-2}$ нм дает возможность оценить необходимое число фотонов в методе Монте-Карло. Этот прием позволяет существенно сократить время проведения численных расчетов, а также позволяет провести валидацию модели и используемого алгоритма.

В качестве примера реализации расчетов методом Монте-Карло с ограниченным диапазоном длин волн на рис. 9 представлены результаты расчета вертикального профиля распределения биологически активного солнечного излучения диапазонов УФ-Б и УФ-А в водной среде с эталонным спектром ослабления a1 [10].

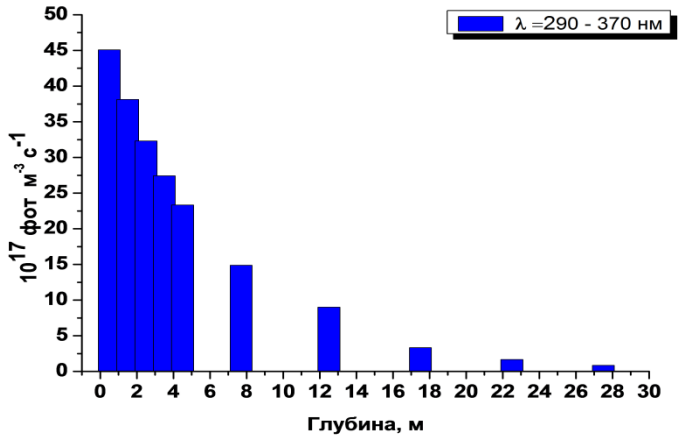


Рис. 9. Численное моделирование вертикального профиля распределения в водной среде плотности фотонов биологически активных УФ-Б и УФ-А диапазонов

Для тестового использования методики важно, что результаты расчета находятся в хорошем согласии с результатом, полученным дискретно-ординатным методом с помощью алгоритма DISORT.

Моделирование 2D и 3D полей облученности в условиях сложных рельефов требует разработки специальных средств тестирования и валидации полученных результатов. Исследования в данном направлении будут продолжены.

Основная проблема использования вероятностных методов заключается в высоких требованиях к вычислительным ресурсам. Вследствие этого, они в значительной степени остаются «теоретическими», и для большинства вычислительных систем пока не могут конкурировать с широко распространенными дискретно-ординатными методами.

В то же время, связи с развитием компьютерной техники и совершенствованием вычислительных алгоритмов, численное моделирование процессов переноса излучения, основанное на методе Монте-Карло в его различных модификациях становится весьма перспективным направлением, и в последнее время активно развивается.

Выводы. В работе показаны возможности разработанной методики комплексного исследования облученности поверхности и глубинных слоев природных и техногенных водоемов солнечным излучением биологически активных диапазонов.

Методика в рамках общего подхода объединяет данные измерений наземных и погружаемых фотометрических систем с результатами численного моделирования атмосферных процессов, процессами переноса солнечного излучения в водных средах, а также данными орбитальных наблюдений.

Разделение алгоритмов численной модели на атмосферный, поверхностный и водный модули дает возможность гибко адаптировать модель для решения конкретных задач климатологии и экологии водных биосистем.

Отмечена перспективность применения разработанного комплекса для оценки биологического и экологического состояния водных объектов, а также проведения ретроспективного анализа и прогноза его изменений при различных сценариях развития регионального УФ климата.

Проведена предварительная оценка использования вероятностных методов для моделирования полей освещенности водных систем с неоднородными оптическими свойствами и сложным рельефом.

Благодарность. *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».*

Использованная литература:

1. Верес Ю.К. Органическое вещество, его компонентный состав и деструкция в воде озер разного трофического типа: автореф. дисс. канд. биол. наук. Минск, 2013. 23 с.

2. Винберг Г.Г. Экологическая система Нарочанских озер. Минск: «Университетское», 1985. 302 с.

3. Дорожко Н.В. Оценка общей и ультрафиолетовой облученности поверхности озер по данным наземных наблюдений, на примере озер Нарочанской группы // Acta Geographica Silesiana. 2020. 14/1 (37). I No Z, US, Sosnowiec. С. 5-12.

4. Дорожко Н.В., Сидоркина Е.И., Турышев Л.Н., Светашев А.Г. Вариант методики ретроспективного моделирования годовых доз биоэффектов солнечного УФ излучения // Известия Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины. 2024. № 3. С. 144-150.

5. Жукова Т.В. и др. Бюллетень экологического состояния озер Нарочь, Мястро, Баторино (2017 год); под общ. ред. д-ра биол. наук Т. М. Михеевой. Минск: БГУ, 2018. 119 с.

6. Ковалева И.В. Связь первичной продукции с интенсивностью солнечной радиации // Экология моря. 2006. № 72. С. 77-86.

7. Ковалева И.В., Финенко З.З., Чурилова Т.Я., Суслин В.В. Эффективность фотосинтеза фитопланктона в Черном море // Морской экологический журнал. 2009. Т. 8. С. 25-36.

8. Красовский А.Н., Турышев Л.Н., Светашев А.Г., Демин В.С., Дорожко Н.В., Ермолович Ю.Г. Алгоритмы и программное обеспечение для численного моделирования доз облученности водных слоев природных водоемов солнечным излучением различных спектральных диапазонов // Четвертые Виноградовские чтения. Гидрология от познания к мировоззрению. Санкт-Петербург, 23-31 октября 2020 г. С. 106-110.

9. Красовский А.Н. и др. Разработка методики краткосрочного прогноза ультрафиолетового индекса в районе г. Минска // Природные ресурсы. 2005. № 1. С. 15–25.

10. Показеев К.В., Чаплина Т.О., Чашечкин Ю.Д. Оптика океана. Москва: МГУ. 2010. 218 с.

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

12. Седунов Ю.С. Атмосфера (справ. изд.) / ред. Ю.С. Седунов. Ленинград: Гидрометеоиздат. 1991. 510 с.

13. Турышев Л.Н., Атрашевский Ю.И., Денисенко В.Н., Тавгин В.Л. Спектрорадиометр для мониторинга приземного ультрафиолетового солнечного излучения. // Журнал прикладной спектроскопии. 2001. Т. 72. № 2. С. 262-270.

14. Турышев Л.Н., Светашев А.Г., Дорожко Н.В., Ермолович Ю.Г. 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. С. 501.

15. Darozhka N., Barodka S., I. Bruchkouski I., Diomin V., Svetashev A., L. Turishev L., Umreika S. (2020), Simulating irradiance of water layers of natural reservoirs by solar radiation in various spectral ranges, *EGU General Assembly*, Vienna, 2 p.

16. Darozhka, N., Cidorkina, K., Svetashev, A., and Turishev, L. (2021), Simulating irradiance of water layers of natural reservoirs by solar radiation in various spectral ranges, *EGU General Assembly*, online, 19–30 Apr 2021, EGU21-14894, https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-14894, 2021.

17. Mayer B., Hamann U., Emde C., Kylling A. Libradtran /July 26, 2005. // Mode of access: http: // www.libradtran.org – Date of access: 05.02.2008.

18. Mayer B. I3RC phase 1 results from the MYSTIC Monte Carlo model Extended abstract for the I3RC workshop, Tucson, Arizona, November 17–19, 1999, P. 1-7.

19. https://www.earthdata.nasa.gov/sensors/avhrr

20. https://exp-studies.tor.ec.gc.ca/cgi-bin/clf2/selectMap

21. http://libradtran.org/doku.php?id=basic_usage

22. https://www.mathworks.com/products/mathlab.htm

23. https://www.mmm.ucar.edu/models/wrf

24. https://www.originlab.com//ServiceReleases

25. Zerefos et al. (2023), Long-term variability of human health related solar ultraviolet-b radiation doses from the 1980s to the end of the 21st century, *Physiological Review*, Vol. 103, pp. 1789-1826.

References:

1. Veres Yu.K. (2013), *Organic matter, its component composition and destruction in the water of lakes of different trophic types: abstract of diss. ... candidate of biological sciences*, Minsk, 23 p. (In Russ.).

2. Vinberg G.G. (1985), *Ecological system of the Naroch lakes*, Minsk, 302 p. (In Russ.).

3. Darozhka N.V. (2020), Assessment of total and ultraviolet irradiance of the lake surface based on ground-based observations, using the lakes of the Naroch group as an example, *Acta Geographica Silesiana*, 14/1 (37), I No Z, US, Sosnowiec, pp. 5-12 (In Russ.).

4. Darozhka N.V., Sidorkina E.I., Turyshev L.N., Svetashev A.G. (2024), A variant of the methodology for retrospective modeling of annual doses of bioeffects of solar UV radiation, *News of the Gomel State University named after F. Skorina*, No. 3, pp. 144-150. (In Russ.).

5. Zhukova T.V. et al. (2018), *Bulletin of the ecological state of lakes Naroch, Myastro, Batorino (2017)*, Minsk, 119 p. (In Russ.).

6. Kovaleva I.V. (2006), Relationship between primary production and solar radiation intensity // *Ecology of the sea*, No. 72, pp. 77-86. (In Russ.)/

7. Kovaleva I.V., Finenko Z.Z., Churilova T.Ya., Suslin V.V. (20009), Efficiency of phytoplankton photosynthesis in the Black Sea, *Marine Ecological Journal*, Vol. 8, pp. 25-36. (In Russ.).

8. Krasovsky A.N., Turyshev L.N., Svetashev A.G., Demin V.S., Dorozhko N.V., Ermolovich Yu.G. (2020), Algorithms and software for numerical modeling of irradiation doses of water layers of natural reservoirs by solar radiation of various spectral ranges, *The Fourth Vinogradov Readings. Hydrology from knowledge to worldview*, St. Petersburg, October 23-31, 2020, pp. 106-110 (In Russ.).

9. Krasovsky A.N. et al. (2005), Development of a methodology for short-term forecasting of the ultraviolet index in the Minsk region, *Natural Resources*, No. 1, pp. 15-25. (In Russ.).

10. Pokazeev K.V., Chaplina T.O., Chashechkin Yu.D. (2010), *Ocean Optics*, Moscow, 218 p. (In Russ.).

11. *Relationship between quantitative and qualitative indicators of formation of organic matters of reservoirs and downstream river sections of watercourses with some optical characteristics of water bodies* (2018), report on R & D of the State Program of Scientific Research for 2016-2020, "Nature Management and Ecology", 10.3 "Radiation and Natural Systems", Minsk, 63 p. (In Russ.).

12. Sedunov Yu.S. (1991), *Atmosphere*, Ed. Yu.S. Sedunov, Leningrad, 510 p. (In Russ.).

13. Turyshev L.N., Atrashevsky Yu.I., Denisenko V.N., Tavgin V.L. (2001), Spectroradiometer for monitoring surface ultraviolet solar radiation, *Journal of Applied Spectroscopy*, Vol. 72, No. 2, pp. 262-270. (In Russ.).

14. Turyshev L.N., Svetashev A.G., Dorozhko N.V., Ermolovich Yu.G. (2019), Numerical modeling of solar radiation propagation processes in the earth's atmosphere and the aquatic environment of natural reservoirs, *Proceedings of the XXVI open all-Russian scientific conference "Radio wave propagation"*, Kazan, July 1-6, 2019, p. 501. (In Russ.).

15. Darozhka N., Barodka S., I. Bruchkouski I., Diomin V., Svetashev A., L. Turishev L., Umreika S. (2020), Simulating irradiance of water layers of natural reservoirs by solar radiation in various spectral ranges, *EGU General Assembly*, Vienna, 2 p.

16. Darozhka, N., Cidorkina, K., Svetashev, A., and Turishev, L. (2021) Simulating irradiance of water layers of natural reservoirs by solar radiation in various spectral ranges, *EGU General Assembly*, online, 19–30 Apr 2021, EGU21-14894, https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-14894, 2021.

17. Mayer B., Hamann U., Emde C., Kylling A. Libradtran /July 26, 2005. //Mode of access: http: // www.libradtran.org – Date of access: 05.02.2008.

18. Mayer B. I3RC phase 1 results from the MYSTIC Monte Carlo model Extended abstract for the I3RC workshop, Tucson, Arizona, November 17–19, 1999, pp. 1-7.

19. https://www.earthdata.nasa.gov/sensors/avhrr

20. https://exp-studies.tor.ec.gc.ca/cgi-bin/clf2/selectMap

21. http://libradtran.org/doku.php?id=basic_usage

22. https://www.mathworks.com/products/mathlab.htm

23. https://www.mmm.ucar.edu/models/wrf.

24. https://www.originlab.com//ServiceReleases.

25. Zerefos et al. (2023), Long-term variability of human health related solar ultraviolet-b radiation doses from the 1980s to the end of the 21st century, *Physiological Review*, Vol. 103, pp. 1789-1826.

Сведения об авторах:

Бородко Сергей Константинович – Национальный научно-исследовательский центр мониторинга озоносферы, Белорусский государственный университет (Минск, Беларусь), научный сотрудник. E-mail: skbarodka@gmail.com

Дорожко Наталья Васильевна – Национальный научно-исследовательский центр мониторинга озоносферы, Белорусский государственный университет (Минск, Беларусь), научный сотрудник. E-mail: natashka_d10.05@mail.ru

Мурашко Олег Артурович – Национальный научно-исследовательский центр мониторинга озоносферы, Белорусский государственный университет (Минск, Беларусь), младший научный сотрудник. E-mail: olegmurashkoo@gmail.com

Новак Елизавета Игоревна – Национальный научно-исследовательский центр мониторинга озоносферы, Белорусский государственный университет (Минск, Беларусь), младший научный сотрудник. E-mail: elizavetanovak23@gmail.com

Светашев Александр Георгиевич – Национальный научно-исследовательский центр мониторинга озоносферы, Белорусский государственный университет (Минск, Беларусь), кандидат физико-математических наук. E-mail: asvetashev@tut.by

Сидоркина Екатерина Игоревна – Национальный научно-исследовательский центр мониторинга озоносферы, Белорусский государственный университет (Минск, Беларусь), младший научный сотрудник. E-mail: kate_rfe@yahoo.com

Туболев Вадим Алексеевич – Национальный научно-исследовательский центр мониторинга озоносферы, Белорусский государственный университет (Минск, Беларусь), младший научный сотрудник. E-mail: tubolevva@gmail.com

Яротов Алексей Евгеньевич – Национальный научно-исследовательский центр мониторинга озоносферы, Белорусский государственный университет (Минск, Беларусь), кандидат географических наук, доцент. E-mail: yarotau@gmail.com

Information about the authors:

Siarhei Barodka – National Ozone Monitoring Research Centre, Belarusian State University (Minsk, Belarus), researcher. E-mail: skbarodka@gmail.com

Natalia Darozhka – National Ozone Monitoring Research Centre, Belarusian State University (Minsk, Belarus), researcher. E-mail: natashka_d10.05@mail.ru

Aleh Murashka – National Ozone Monitoring Research Centre, Belarusian State University (Minsk, Belarus), junior researcher. E-mail: olegmurashkoo@gmail.com

Elizaveta Novak – National Ozone Monitoring Research Centre, Belarusian State University (Minsk, Belarus), junior researcher. E-mail: elizavetanovak23@gmail.com

Aleksandr Svetashev – National Ozone Monitoring Research Centre, Belarusian State University (Minsk, Belarus), PhD in physics and mathematics. E-mail: asvetashev@tut.by

Katsiaryna Cidorkina – National Ozone Monitoring Research Centre, Belarusian State University (Minsk, Belarus), junior researcher. E-mail: kate_rfe@yahoo.com

Vadzim Tuboleu – National Ozone Monitoring Research Centre, Belarusian State University (Minsk, Belarus), junior researcher. E-mail: tubolevva@gmail.com

Aliaksei Yarotau – National Ozone Monitoring Research Centre, Belarusian State University (Minsk, Belarus), PhD in geography, Associated Professor. E-mail: yarotau@gmail.com

Для цитирования:

Бородко С.К., Дорожко Н.В., Мурашко О.А., Новак Е.И., Светашев А.Г., Сидоркина Е.И., Туболев В.А., Яротов А.Е. Комплексные исследования облученности биологически активным солнечным излучением поверхности и глубинных слоев природных водоемов // Центральноазиатский журнал географических исследований. 2025. № 1-2. С. 6-20.

For citation:

Barodka S.K., Darozhka N.V., Murashka A.A., Novak E. I., Svetashev A.G., Sidorkina E.I., Tubolev V.A., Yarotau A.E. (2025), Comprehensive studies of irradiation of biologically active solar radiation of the surface and deep layers of natural water bodies, *Central Asian Journal of Geographical Researches,* No. 1-2, pp.6-20. (In Russ.).