

УДК: 912.4

DOI: 10.35595/2414-9179-2025-2-31-245-258

В. Ю. Третьяков<sup>1</sup>, В. В. Дмитриев<sup>2</sup>, С. М. Клубов<sup>3</sup>

## МЕТОДИКА ВЫЯВЛЕНИЯ ВНУТРИГОДОВОЙ ДИНАМИКИ ИНТЕНСИВНОСТИ ПЕРВИЧНОГО БИОСИНТЕЗА ВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ ПО ДАННЫМ ДЗЗ

### АННОТАЦИЯ

Водные экосистемы характеризуются пятнистым характером распределения фитопланктона и быстротой изменения его удельной биомассы и интенсивности первичного биосинтеза в течение всего года, а особенно в течение вегетационного периода. При проведении натурных исследований легко пропустить зоны повышенных концентраций и периоды интенсивного развития фитопланктона, его «вспышки» или «периоды цветения», т. к. они могут продолжаться всего несколько суток. Из-за этого не всегда корректно определяется продуктивность водной экосистемы, ее трофический статус, степень устойчивости к изменению параметров естественного режима и антропогенного воздействия. В статье рассматривается авторская методика исследования внутригодовой динамики интенсивности первичного биосинтеза водной экосистемы с помощью анализа временной изменчивости значений индексов NDVI (нормализованного вегетационного) и NDTI (мутности), рассчитываемых по спутниковым данным Landsat. Растровые слои этих данных могут целиком покрывать исследуемые акватории, их повторяемость составляет несколько сроков за месяц. Результаты пространственно-временного анализа индексов NDVI и NDTI существенно дополняют данные мониторинга состава и численности фитопланктона в водной экосистеме и объективно отражают его пространственное распределение в водоеме. Диапазон изменения индекса NDVI отражает диапазон интенсивности первичного биосинтеза фитопланктона, а временные динамики среднего, минимального и максимального значений индекса для всей исследуемой акватории в целом — особенности развития фитопланктона в течение вегетационного периода, количество периодов интенсивного развития фитопланктона, их временную локализацию и продолжительность. Исследование пространственной изменчивости значений индекса NDVI позволяет выявить объективное подразделение акватории на отдельные экологические зоны. Благодаря параллельному исследованию пространственно-временной изменчивости индексов NDVI и NDTI и корреляционной связи между ними возможно выявление влияния мутности воды на первичный биосинтез и определение причин изменения мутности. Исследователь получает возможность выяснить, является ли источником мутности терригенная взвесь, частицы донных осадков, пыльца растений, или же имеет место затенение фитопланктона самими одноклеточными организмами (самозатенение). Представленная методика применена для исследования экосистемы малого оз. Суури на севере Карельского перешейка. Это озеро расположено на территории Учебно-научной базы «Приладожская» СПбГУ, на которой проходят практики студенты ряда учебных направлений.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** интенсивность биосинтеза фитопланктона, дистанционное зондирование Земли, NDVI, NDTI

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный университет, Университетская наб., д. 7/9, Санкт-Петербург, Россия, 199034, e-mail: [v.tretiyakov@spbu.ru](mailto:v.tretiyakov@spbu.ru)

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный университет, Университетская наб., д. 7/9, Санкт-Петербург, Россия, 199034, e-mail: [v.dmitriev@spbu.ru](mailto:v.dmitriev@spbu.ru)

<sup>3</sup> Государственное бюджетное учреждение дополнительного образования Дворец творчества «У Вознесения моста» Адмиралтейского района, ул. Гражданская, д. 26, Санкт-Петербург, Россия, 19031, e-mail: [klubov\\_stepan@mail.ru](mailto:klubov_stepan@mail.ru)

Victor Yu. Tretyakov<sup>1</sup>, Vasilii V. Dmitriev<sup>2</sup>, Stepan M. Klubov<sup>3</sup>

## METHODOLOGY FOR DISCOVERY OF AQUATIC ECOSYSTEMS PRIMARY BIOSYNTHESIS INTENSITY WITHIN-YEAR DYNAMICS ON THE BASE OF THE EARTH REMOTE SENSING

### ABSTRACT

Aquatic ecosystems are characterized by the spotty spatial distribution of phytoplankton and the quick variance of its specific biomass and the primary production intensity throughout the year, and especially for the vegetation period. Therefore, it is easy during natural research to miss zones of the phytoplankton's increased specific biomass and the periods of its intensive development, so-called "blooming", because the periods can last only a few days. Because of this reason, it can oftentimes be difficult to evaluate the productivity of an aquatic ecosystem, its trophic state, degree of steadiness to alteration of the natural regime parameters, and anthropogenic impacts. There is considered the proprietary methodology for research of within-year dynamics of an aquatic ecosystem primary biosynthesis intensity by analysis of temporal variability of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and the Normalized Difference Turbidity Index (NDTI). The indices are evaluated by satellite data from Landsat Program. The raster layers of the satellite data can in full occupy researched water areas. The data frequency is equal to a few times per a month. Results of the spatial and temporal analysis of the indices essentially fill up data of phytoplankton monitoring within an aquatic ecosystem and reflect the phytoplankton spatial distribution. The range of the NDVI variation reflects the range of the phytoplankton primary biosynthesis intensity. The temporal dynamics of average, minimal, and maximal values of the index for all the researched water area as a whole reflect specificity of the phytoplankton development for the vegetation period, number of the phytoplankton intensive growth periods (algal blooms), and temporal localization and duration of the periods. Research of the NDVI values spatial variability allows ascertaining of a water area objective partition into ecological zones. Owing to parallel research of spatial and temporal variability of the NDVI and NDTI indices, and the correlation relationship between them, we can reveal the water turbidity influence on the primary biosynthesis and designate reasons for the turbidity alterations. A researcher obtains an opportunity of response for a question about the turbidity reason. It can be terrigenous suspended matter, particles of the bottom sediments, or plant pollen. In addition, it can take place the phytoplankton occultation by its cells, so-called self-shadowing. The presented methodology was applied for research of the Suuri Lake ecosystem. The lake is situated within the north part of the Karelian Isthmus, inside the area of the Training and Scientific Facility "Priladozhskaya" of St. Petersburg State University.

**KEYWORDS:** phytoplankton biosynthesis intensity, Earth remote sensing, NDVI, NDTI

### ВВЕДЕНИЕ

Крайне актуальными являются оценки трофического статуса и степени загрязнения экосистем внутренних водоемов, эстуариев и прибрежных морских акваторий. Однако внутригодовой цикл функционирования этих экосистем характеризуется высокой скорос-

---

<sup>1</sup> Saint Petersburg State University, 7/9, Universitetskaya emb., St. Petersburg, 199034, Russia,  
*e-mail:* [v.tretyakov@spbu.ru](mailto:v.tretyakov@spbu.ru)

<sup>2</sup> Saint Petersburg State University, 7/9, Universitetskaya emb., St. Petersburg, 199034, Russia,  
*e-mail:* [v.dmitriev@spbu.ru](mailto:v.dmitriev@spbu.ru)

<sup>3</sup> State Budgetary Institution of Additional Education, Palace of Child Youth Art "At the Voznesensky Bridge" of the Admiralteyskiy District, 26, Grazhdanskaya str., St. Petersburg, 190031, Russia,  
*e-mail:* [klubov\\_stepan@mail.ru](mailto:klubov_stepan@mail.ru)

тью изменения интенсивности первичного биосинтеза фитопланктона. Периоды высоких удельных биомасс фитопланктона в течение года могут неоднократно сменяться временными интервалами крайне низких значений биомассы и интенсивности первичного биосинтеза. Внутригодовая динамика интенсивности первичного биосинтеза определяет функционирование всей водной экосистемы.

Политика импортозамещения предполагает широкое развитие хозяйств по разведению ценных видов рыб в озерах северной части Карельского перешейка и в Карелии. Однако привнесение в озерные экосистемы дополнительных объемов соединений азота и фосфора в составе кормов, фекалий и экскретов разводимых рыб чревато эвтрофикацией водоемов. Для определения экологически обоснованных пределов антропогенного воздействия необходимо понимание внутригодовой динамики интенсивности первичного биосинтеза в озерных экосистемах, находящихся в состоянии, близком к естественному. Именно такова экосистема оз. Суури (рис. 1), антропогенное воздействие на которую незначительно. Площадь озера составляет около 0,28 км<sup>2</sup>, максимальная глубина около 6 м. Сток осуществляется по ручью Мянти-Лампи в залив Лехмалахти Ладожского оз. Питание — атмосферное и подземное. Озеро островами разделено на два плеса. Дно илистое. Высшая водная растительность представлена рдестами. Озеро окружено покрытыми хвойными и смешанными лесами скальными грядовыми возвышенностями — сельгами.

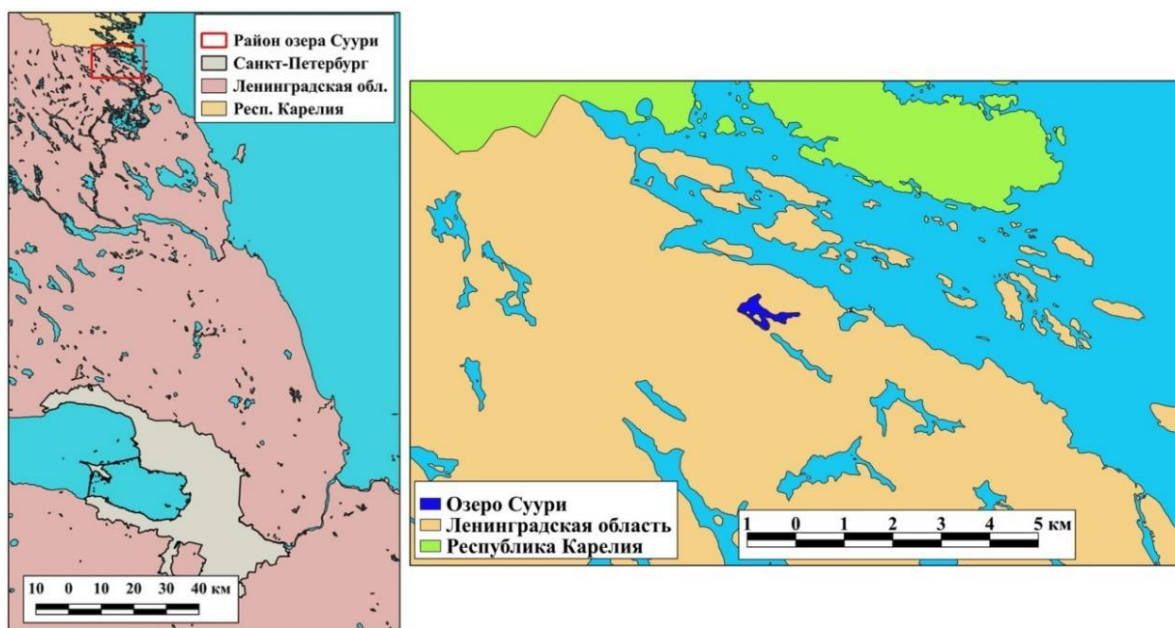


Рис. 1. Местоположение оз. Суури

Fig. 1. Location of Suuri Lake

Одна из наиболее актуальных научных проблем современности — оценка и прогноз изменения продуктивности природных наземных и водных экосистем [Титлянова, 1983]. Ее решение служит основой для рационального использования, охраны, ресурсо- и жизнеобеспечения, воспроизводства биоресурсов. Частной задачей в рамках этой проблемы является исследование внутригодовой динамики и пространственного изменения удельных скоростей первичного биосинтеза водной экосистемы. Крайне актуальными являются также оценки изменения трофического статуса водных экосистем. Приведем некоторые особенности таких исследований:

- сложность сравнения продуктивности разных экосистем, характеризующихся доминированием разных таксонов во временной динамике и пространстве;

- необходимость учета региональных особенностей изменения климатических параметров, масштабов и источников антропогенного воздействия на фоне естественных изменений влияющих факторов;
- сложность совместного учета влияния лимитирующих первичную продукцию факторов, когда в один интервал времени их совокупный эффект лучше описывается одним типом моделей, а в другой лучшее совпадение с реальностью обеспечивают иные типы моделей.

Дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) позволяет выявить подробности, которые при проведении натурных наблюдений невозможно учесть или которые требуют больших финансовых затрат. Спутниковые данные ориентированы на контроль природных и антропогенных явлений и процессов, протекающих на значительных площадях с помощью значений ряда индексов:

- NDVI — нормализованный разностный индекс растительности;
- NDRE — нормализованный индекс красного спектрального края;
- MSAVI — модифицированный индекс растительности, скорректированный по почве;
- MCARI — индекс для измерения концентрации хлорофилла;
- NDTI — нормализованный разностный индекс мутности;
- а также некоторых других.

Эти индексы — это показатели, представляющие собой соотношения интенсивностей отраженного от поверхности Земли излучения Солнца в разных диапазонах спектра. При крупномасштабной съемке дистанционное зондирование предоставляет возможность выявления быстро протекающих в растительном покрове процессов [Баширова, 2019]. NDVI может также применяться для изучения внутригодовой динамики первичной продуктивности водных экосистем. Однако NDVI может отражать только линейные зависимости между соотношением излучения в ближнем инфракрасном (NIR) и красном диапазонах спектра и продуктивностью экосистемы. Для учета взаимосвязей более высокого порядка предложено использовать индекс kNDVI, который обеспечивает более высокую точность при оценке параметров растительности [Wang et al., 2023]. Разработаны методы для улучшения согласованности NDVI с динамикой фотосинтеза, что позволяет более точно отслеживать сезонные изменения продуктивности [Wang et al., 2017]. Разработка новых индексов и улучшение способов использования NDVI повышают точность и надежность исследований в этой области [Li et al., 2023]. Индекс мутности (NDTI) характеризует уменьшение прозрачности воды из-за взвешенных частиц и/или развития планктона. При расчетах данного индекса используется только видимый диапазон спектра, что позволяет использовать данные съемок с высоким пространственным разрешением<sup>1</sup>.

Целью работы является разработка авторской методики определения внутригодовой динамики интенсивности первичного биосинтеза фитопланктона в водной экосистеме с помощью анализа временной изменчивости значений индексов NDVI (нормализованного вегетационного) и NDTI (мутности), рассчитываемых по данным дистанционного зондирования Земли.

В водоемах умеренного климата динамика интенсивности первичного биосинтеза демонстрирует ярко выраженную сезонность. Как отмечают исследователи [Makarevich et al., 2012], обычно наблюдаются два пика интенсивности первичного биосинтеза. Первый отмечается весной. Он характеризуется преобладанием диатомовых водорослей и совпа-

<sup>1</sup> Виды водных индексов и их применение. Электронный ресурс: <https://innoter.com/articles/vidy-vodnykh-indeksov-i-ikh-primenenie/> (дата обращения 24.04.2025)

дает с увеличением температуры и освещенности. Второй пик приходится на вторую половину лета [Gamier et al., 1995]. В ходе этого пика преобладают классы водорослей *Chrysophyceae* и *Dinophyceae* [Blaauboer, 1982]. Отмечается, что могут происходить вспышки и в другое время года в связи с доступностью питательных веществ [Munawar, Talling, 1986]. Подобная внутригодовая динамика отмечена как в пресных водоемах (Куйбышевское вдхр. [Rakhuba, 2012], озерах Центральной Европы [Sommer et al., 1986], оз. Кортвовское [Jaworska et al., 2014]), так и в морских экосистемах (Гданьский зал. [Kudryavtseva et al., 2023], Вислинский и Брестский зал. [Poppeschi et al., 2022], Белое море [Radchenko et al., 2023]).

Несмотря на постоянство общей динамики интенсивности первичного биосинтеза фитопланктона в умеренном поясе, на нее могут влиять различные факторы. Изменения климата и антропогенных воздействий могут нарушать традиционные сезонные циклы и приводить к нерегулярным колебаниям биомассы [Winder, Cloern, 2010]. В Финском, Куршском и Вислинском зал. отмечается два пика повышения интенсивности первичного биосинтеза. Первый наблюдается во второй половине весны и связан с «цветением» диатомовых водорослей, второй — летом и связан с «цветением» цианобактерий. Летний «пик» (июль–сентябрь) происходит на фоне высокого прогрева воды ( $>20\text{--}22\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Такая температура оптимальна для цианобактерий. В Вислинском зал. интенсивность и длительность «цветения» цианобактерий ниже, чем в Куршском зал. из-за большей солености и лучшего водообмена [Александров и др., 2022]. В Невской губе и восточной части Финского зал. максимальные количественные показатели развития фитопланктона отмечались в весенний период. В биомассе преимущественно доминировали диатомовые и динофитовые. Летом биомасса была, в основном, ниже весенней, в ней возрастала доля цианопрокариот, в отдельные годы — криптофитовых и зеленых, осенью биомасса относительно летней понижалась, доминировали цианопрокариоты и криптофитовые [Ляшенко и др., 2020]. Процессы в мелководных пресноводных экосистемах умеренного пояса протекают аналогично процессам в прибрежных сильно распресненных морских экосистемах, в них представлены те же группы фитопланктона.

Индекс нормализованной разности растительности (NDVI) широко используется для оценки первичной продуктивности в различных экосистемах. В контексте изучения внутригодовой динамики фитопланктона NDVI может быть полезен для оценки сезонных изменений в биомассе и продуктивности. В прибрежных экосистемах NDVI помогает оценивать сезонную динамику микрофитобентоса. Однако на результаты оценки могут повлиять вспышки численности аллохтонных микроорганизмов [Wang et al., 2023].

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве исходных данных использованы изображения поверхности Земли спутниковых систем Sentinel-2<sup>1</sup> и Landsat-8<sup>2</sup>. Изображения Sentinel-2 имеют размеры ячеек  $10\times 10$  м, пространственное разрешение ячеек изображений Landsat-8 —  $30\times 30$  м. Нормализованный разностный индекс растительности NDVI показывает интенсивность фотосинтеза. Он рассчитывается по формуле (1):

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{RED}) / (\text{NIR} + \text{RED}) \quad (1),$$

<sup>1</sup> Сайт программы Европейской миссии Copernicus. Электронный ресурс: <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home> (дата обращения 15.05.2022)

<sup>2</sup> Сайт Геологической службы США. Электронный ресурс: <https://earthexplorer.usgs.gov/> (дата обращения 20.05.2022)



где NIR — интенсивность отраженной солнечной радиации в ближней инфракрасной области спектра,  
RED — интенсивность отраженной солнечной радиации в красной области спектра.

Диапазон возможных значений: от  $-1$  до  $1$ . Величина  $1$  означает максимальную интенсивность фотосинтеза, когда вся солнечная радиация в красном диапазоне спектра поглощается растительностью. Нормализованный разностный индекс мутности NDTI показывает наличие в воде взвешенных частиц, рассчитывается по формуле (2):

$$NDTI = (RED - GREEN) / (RED + GREEN) \quad (2),$$

где RED — интенсивность отраженной солнечной радиации в красной области спектра,  
GREEN — интенсивность отраженной солнечной радиации в зеленой области спектра.

Диапазон возможных значений также от  $-1$  до  $1$ . Значение  $1$  показывает максимальное наличие в воде взвешенных частиц. Скачанные файлы изображений представляют собой матрицы интенсивности отраженного поверхностью Земли солнечного излучения в различных диапазонах спектра. Системы координат этих файлов: Universal Transverse Mercator 35N и 36N. Обработка спутниковой информации выполнялась в геоинформационной системе QGIS.

Разумеется, акватория оз. Суури занимает незначительную часть скачанных изображений. В системе QGIS выполнялась обрезка растров по границе изучаемой акватории. Поскольку точность локализации изображений спутниковых систем Sentinel-2 и Landsat-8 не превышает  $2$  м, граница исследуемой акватории была построена на основании спутниковых изображений с некоторым смещением от береговой черты на векторном слое озера (рис. 2). Береговая черта оз. Суури была определена по снимкам, выполненным в весенний сезон до развития макрофитов и прибрежной полуводной растительности. Различия смещения границы исследуемой акватории от береговой черты определяются характером берегов. В случае скалистых берегов, представляющих собой практически вертикальные обрывы, смещение было минимально. На прибрежных мелководьях, где летом происходит развитие прибрежной и погруженной водной растительности, это смещение задавалось максимальным. Максимальное смещение составляет до  $20$  м для исключения мелководий с интенсивным развитием макрофитов и отражением солнечной радиации от донных отложений.

Расчеты индексов выполнялись с помощью Калькулятора растров. Чтобы исключить при статистической обработке ячейки растровых слоев индексов, хотя бы частично расположенные вне исследуемой акватории, эти слои преобразовывались в векторные слои шейпфайлов. Каждая ячейка раstra превращалась в квадратный полигон векторного слоя с сохранением. Затем выполнялась оверлейная операция «извлечения по расположению», при которой в новый шейпфайл отбирались только полностью расположенные внутри исследуемой акватории квадраты.

Анализ внутригодовой динамики значений вегетационного индекса NDVI требует определения чувствительности, «порогового» значения, ниже которого значения индекса неинформативны. Для этого на основании изображений Sentinel-2 был создан векторный полигональный слой участков дорог с асфальтовым покрытием рядом с оз. Суури. По изображениям Sentinel-2, созданным на базе спутниковых снимков 21 мая 2022 г., были рассчитаны значения NDVI для исследуемой акватории оз. Суури и участков дорог. Созданный растровый слой NDVI был преобразован в векторный слой совпадающих с ячейками раstra квадратов, из которого в отдельные слои были извлечены квадраты, полностью расположенные в пределах исследуемой акватории и участков дорог. На рис. 3 приведены значения NDVI на акватории озера и на асфальтированных дорогах.

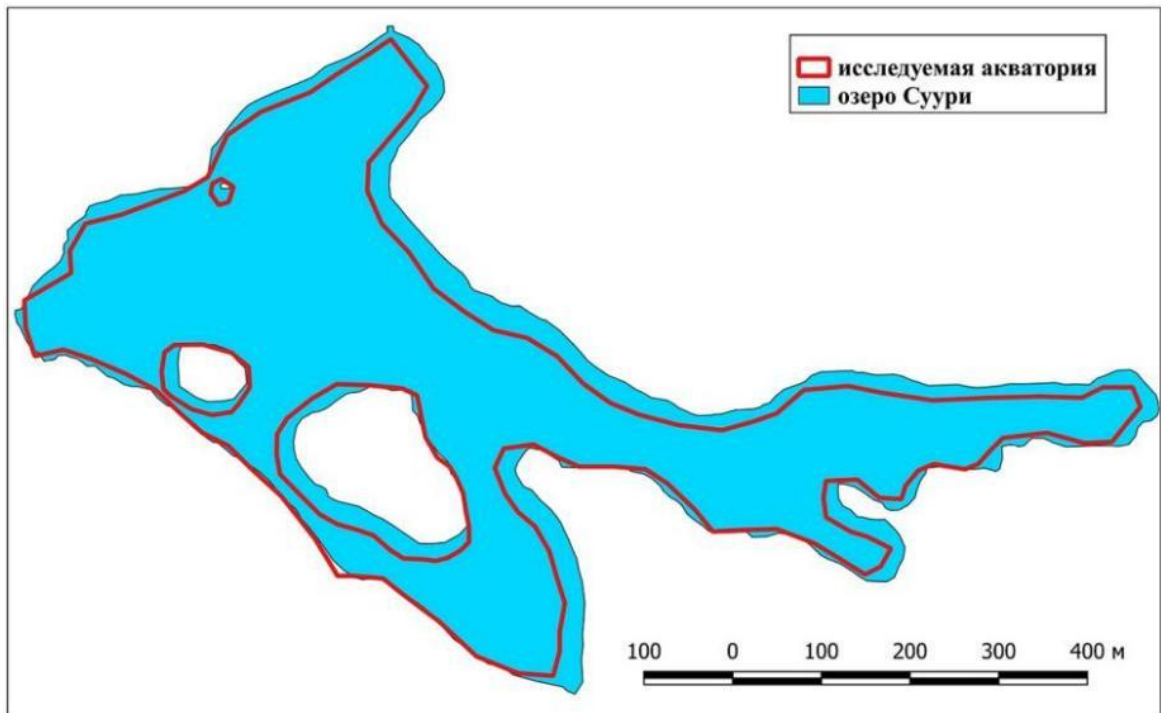


Рис. 2. Исследуемая акватория озера Суури  
Fig. 2. Researched water area of Suuri Lake

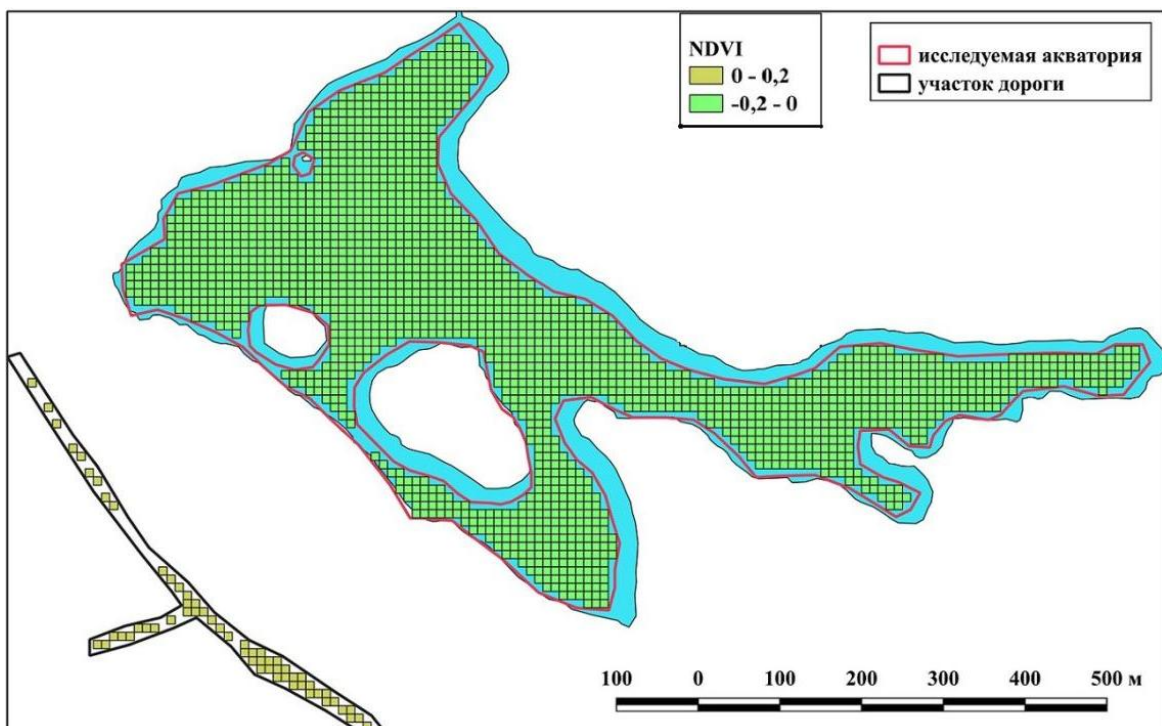


Рис. 3. Значения NDVI на исследуемой акватории озера Суури  
и на участках асфальтированных дорог 21 мая 2022 г.  
Fig. 3. NDVI values within the researched water area of Suuri Lake  
and asphalt roads on the 21 May of 2022

Для определения средних значений индекса NDVI для изучаемой акватории и участков дорог таблицы атрибутов соответствующих векторных слоев были экспортированы в файлы таблиц Microsoft Excel, в которых были рассчитаны средние значения. Оценка однородности значений индекса NDVI в пределах акватории определялась построением гистограмм распределения значений и проверки нулевой гипотезы о соответствии распределения значений нормальному закону с помощью критерия Пирсона в среде Mathcad с помощью специально разработанных программ. Корреляция между значениями индексов NDVI и NDTI определялась следующим образом. Индексы рассчитывались по растровым спутниковым данным, относящимся к одному и тому же сроку. Полученные растровые слои индексов преобразовывались в векторные слои, полигональные объекты которых (квадраты из ячеек исходных растровых слоев) пространственно совпадали. Затем с помощью опции «Объединение атрибутов по расположению» выполнялась генерация нового векторного слоя, таблица атрибутов которого содержит поля обоих исходных слоев. Значения полей каждой записи этой таблицы соответствуют атрибутам пространственно совпадающих объектов (квадратов) слоев «родителей». Таблица атрибутов вновь сгенерированного слоя экспортировалась в таблицу Microsoft Excel, в которой выполнялся расчет коэффициента корреляции.

На акваториях многих мелководных водоемах летом происходит распространение макрофитов (погруженной высшей водной растительности). Эта растительность препятствует интенсивному развитию фитопланктона. Однако расходование растворенного кислорода на окисление отмерших макрофитов осенью и особенно зимой в период существования ледяного покрова может привести к дефициту растворенного кислорода и заморам гидробионтов, в первую очередь ихтиофауны. Для выделения зон с наличием макрофитов и их отсутствием может быть полезной классификация в QGIS векторного слоя значений NDVI методом естественных интервалов с разделением значений на два диапазона. При этом методе геоинформационная система автоматически анализирует интегральную функцию распределения значений, находит на ней места скачков и в этих местах устанавливает границы диапазонов. Разумеется, для каждого срока спутниковой съемки эти границы будут различны (рис. 4).

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Сравнение значений NDVI, рассчитанных по результатам съемки 21.05.2025 для акватории оз. Суури и участков дорог с асфальтовым покрытием, показало, что среднее значение этого индекса на дороге (0,045) превышает его среднее значение для акватории (–0,035). Вероятно, в это время фотосинтез в экосистеме озера еще не начался.

При классификации акватории озера по значению NDVI методом естественных интервалов (рис. 4) области повышенных значений в основном расположены в более мелководных частях акватории. Однако по данным снимка 25.06.2022 повышенные значения индекса наблюдались и в самой глубокой части озера к северу от более крупного острова. Такая классификация, вероятно, не может помочь с выделением зон распространения погруженной водной растительности, которая, в отличие от прибрежной воздушно-водной растительности, не образует сплошного покрова и сосуществует с фитопланктоном.

На рис. 5 представлена временная динамика индекса NDVI на акватории оз. Суури в 2024 г. Рисунок показывает, что средние значения индекса NDVI невысоки в течение всего сезона вегетации. Периоды повышенной интенсивности первичной продукции в 2024 г. приходились на середину июня и вторую половину августа.

На рис. 6 представлен совмещенный график временной изменчивости средних для акватории оз. Суури значений индексов NDVI и NDTI и коэффициента корреляции между ними в течение вегетационного сезона 2024 г.



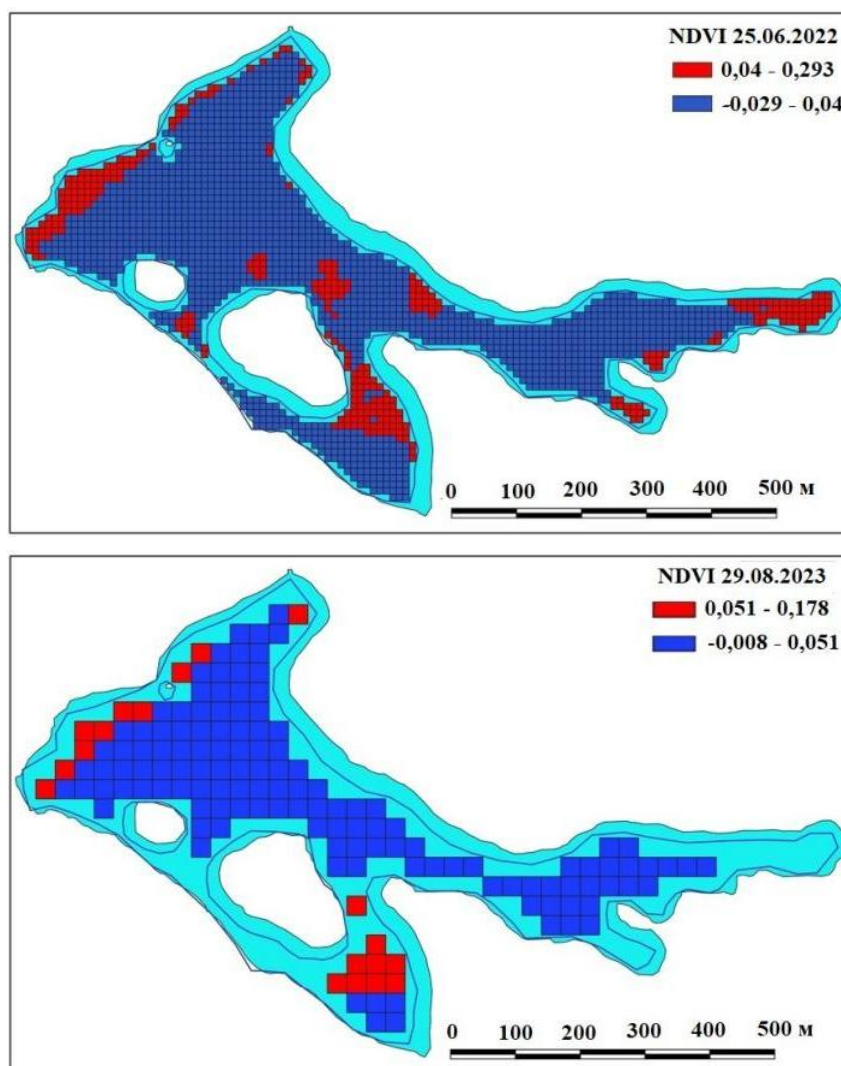


Рис. 4. Классификация методом естественных интервалов акватории оз. Суури по значениям NDVI по данным Sentinel-2 (25.06.2022) и Landsat-8 (29.08.2023)  
Fig. 4. Classification of the Suuri Lake water area by the natural breaks method on the base of the NDVI values of the Sentinel-2 (25.06.2022) and the Landsat-8 (29.08.2023) data

Рисунок 6 демонстрирует, что значения NDTI незначительно изменяются в течение вегетационного сезона. Интервал его некоторого повышения в августе совпадает с периодом повышенных значений NDVI. Возможно, здесь имеет место увеличение мутности воды из-за развития фитопланктона. Значимыми являются только отрицательные значения коэффициента корреляции между индексами. Они наблюдались в конце июня, конце июля и начале августа, а также в сентябре. Сентябрьский интервал значимых отрицательных значений коэффициента корреляции наблюдается после периода повышенных значений NDVI. Вероятно, это следствие самозатенения фитопланктона.

На рисунках 7–9 представлены гистограммы распределения значений индексов NDVI и NDTI акватории оз. Суури в июне 2024 г. Видно, что во всех случаях наблюдаются одномодальные статистические распределения. Слабо выраженная вторая мода присутствует только на графике статистического распределения значений NDVI 13.06.2024. Это свидетельствует о пространственной однородности экосистемы оз. Суури. Применение критерия согласия Пирсона показало, что все статистические распределения индексов NDVI и NDTI 13, 28 и 29 июня 2024 г. не соответствуют нормальному закону.

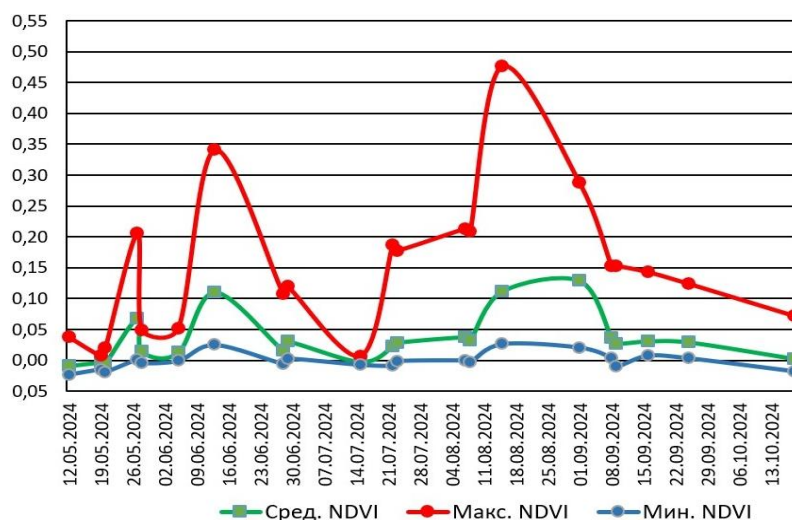


Рис. 5. Временная динамика NDVI на исследуемой акватории оз. Суури  
Fig. 5. Temporal dynamics of the NDVI values within the researched water area of Suuri Lake

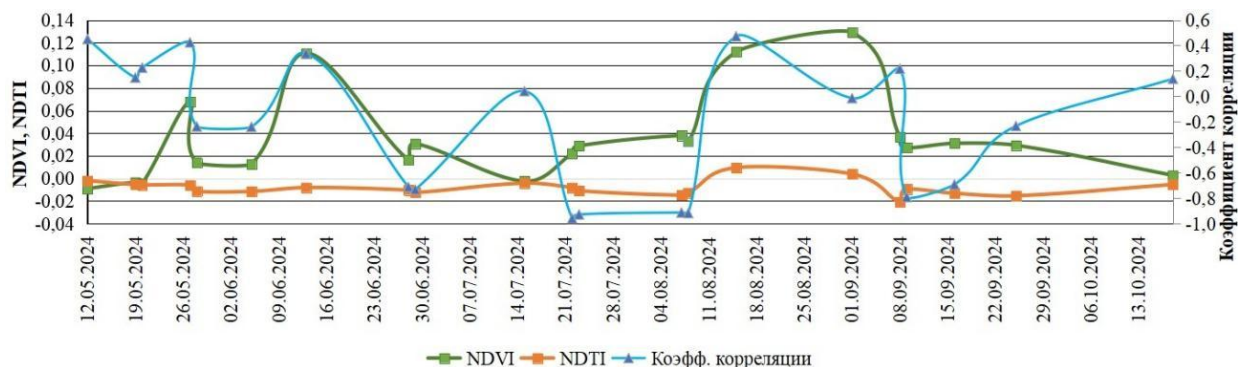


Рис. 6. Временная динамика индексов NDVI, NDTI, и коэффициента корреляции  
между ними на исследуемой акватории оз. Суури  
Fig. 6. Temporal dynamics of the NDVI and NDTI values, and the correlation coefficient  
within the researched water area of Suuri Lake

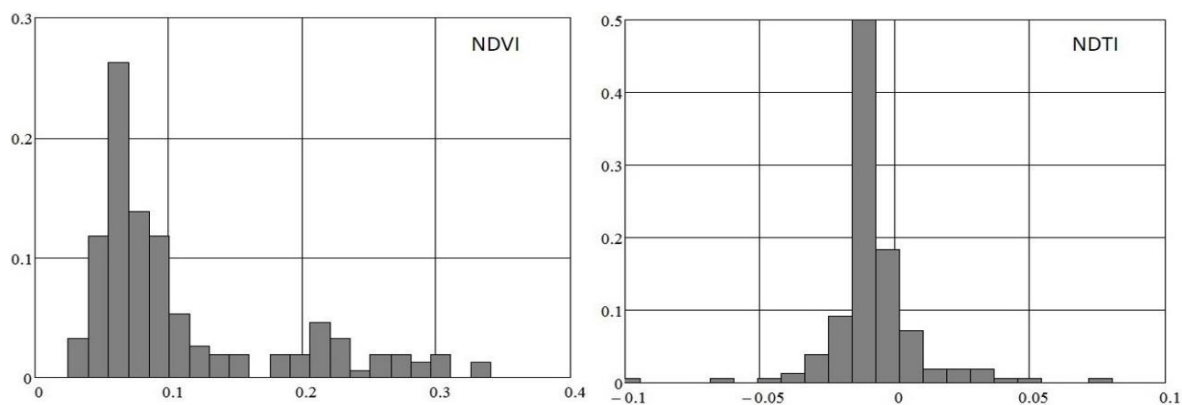
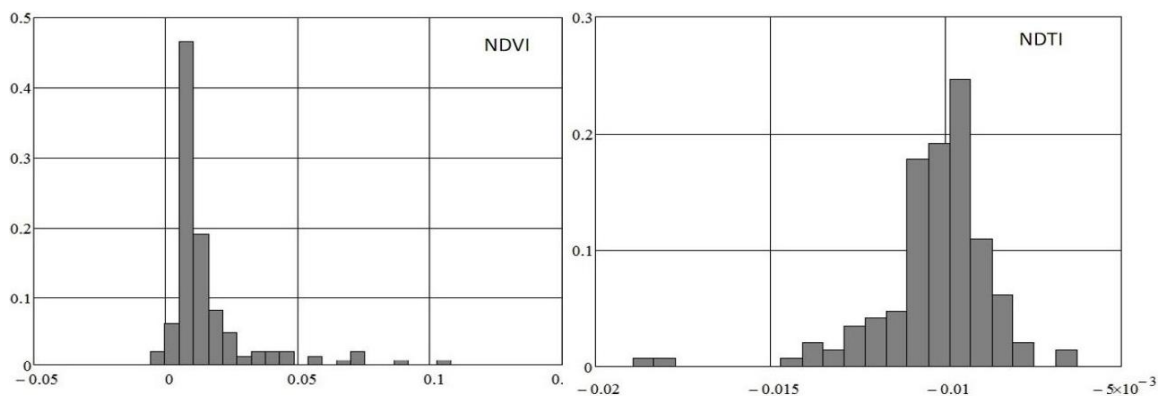
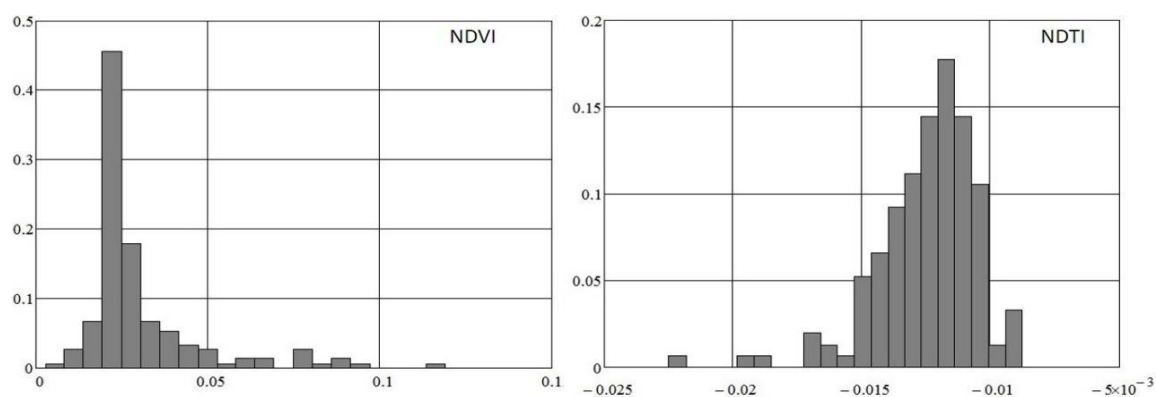


Рис. 7. Статистическое распределение значений индексов NDVI и NDTI  
на исследуемой акватории оз. Суури 13.06.2024  
Fig. 7. Statistical partition of the NDVI and NDTI values within the researched  
water area of Suuri Lake on the 13 of June 2024



*Рис. 8. Статистическое распределение значений индексов NDVI и NDTI на исследуемой акватории оз. Суури 28.06.2024*  
*Fig. 8. Statistical partition of the NDVI and NDTI values within the researched water area of Suuri Lake on the 28 of June 2024*



*Рис. 9. Статистическое распределение значений индексов NDVI и NDTI на исследуемой акватории оз. Суури 29.06.2024*  
*Fig. 9. Statistical partition of the NDVI and NDTI values within the researched water area of Suuri Lake on the 29 of June 2024*

## ВЫВОДЫ

Результаты исследования показали, что анализ пространственной и временной изменчивости индексов NDVI и NDTI позволяет:

- выявлять сезонную динамику интенсивности первичной продукции с определением периодов интенсивного развития фитопланктона;
- определять преобладающий состав взвешенных в воде частиц: абиотическая взвесь или фитопланктон;
- определять особенности взаимосвязей между первичной продукцией фитопланктона и взвешенным в воде веществом (сестоном): лимитирует ли взвешенное вещество фотосинтез фитопланктона, или наоборот, сестон в основном представлен фитопланктоном;
- определять степень пространственной однородности водной экосистемы.

Разработанная методика позволяет без выполнения полевых исследований определять степень пространственной однородности водной экосистемы и особенности цикла ее внутригодового функционирования, что обеспечивает оптимизацию исследований мониторингового типа.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Данное исследование продолжает НИР, выполненную при поддержке РФФ и СПбНФ, проект № 23-27-10011.

## ACKNOWLEDGEMENTS

The study continues the research funded by Russian Science Fund and by St. Petersburg Science Fund, project No. 23-27-10011.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Александров С. В., Буканова Т. В., Семенова А. С.* Динамика биопродуктивности экосистем лагун Балтийского моря под влиянием изменений климата, эвтрофикации и «цветений» цианобактерий. Динамика экосистем в голоцене. Материалы научно-практической конференции, 2022. С. 20–25.

*Баширова Ч. Ф.* Индекс NDVI для дистанционного мониторинга растительности. Молодой ученый, 2019. № 31(269). С. 30–31. Электронный ресурс: <https://help.onesoil.ai/ru/articles/5237493-как-отслеживать-индексы-вегетации-ndvi-msavi-ndre-и-др> (дата обращения 04.03.2025).

*Ляшенко О. А., Падченко А. П., Сулопарова О. Н.* Мониторинг состояния фитопланктона Лужской губы Финского зал. в условиях природного и антропогенного воздействия. Труды ВНИРО. Среда обитания водных биологических ресурсов, 2020. Т. 179. С. 149–163.

*Титлянова А. А.* Методология и методы оценки чистой первичной продукции и построения баланса химических элементов в экосистемах. Теоретические основы и опыт экологического мониторинга. М.: Наука, 1983. С. 63–76.

*Blaauuboer M. C. T.* The Phytoplankton Species Composition and the Seasonal Periodicity in Lake Vechten from 1956–1979. *Hydrobiologia*, 1982. No. 95. P. 25–36.

*Gamier J., Billen G., Coste M.* Seasonal Succession of Diatoms and Chlorophyceae in the Drainage Network of the Seine River: Observations and Modeling. *Limnology and Oceanography*, 1995. No. 40. P. 750–765.

*Jaworska B., Dunalska J., Górniak D., Bowszys M.* Phytoplankton Dominance Structure and Abundance as Indicators of the Trophic State and Ecological Status of Lake Kortowskie (Northeast Poland) Restored with Selective Hypolimnetic Withdrawal. *Archives of Polish Fisheries*, 2014. No. 22. P. 7–15. DOI: 10.2478/aopf-2014-0002.

*Kudryavtseva E., Bukanova T., Kostianoy A., Melnik A., Alexandrov S. Krek A., Kanapatskiy T., Rusanov I., Ezhova E.* Influence of Circulation Processes on Cyanobacteria Bloom and Phytoplankton Succession in the Baltic Sea Coastal Area. *Ecologica Montenegrina*, 2023. No. 70. P. 164–182. DOI: 10.37828/em.2023.70.18.

*Li Z., Wu H., Duan S., Zhao W., Ren H., Liu X., Leng P., Tang R., Ye X., Zhu J., Sun Y., Si M., Liu M., Li J., Zhang X., Shang G., Tang B., Yan G., Zhou C.* Satellite Remote Sensing of Global Land Surface Temperature: Definition, Methods, Products, and Applications. *Reviews of Geophysics*, 2023. No. 61(1). P. 1–18. DOI: 10.1029/2022RG000777.

*Makarevich P., Druzhkova E., Larionov V.* Primary Producers of the Barents Sea. *Diversity of Ecosystems*, 2012. P. 367–392. DOI: 10.5772/37512.

*Munawar M., Talling J. F.* Seasonality of Freshwater Phytoplankton: A Global Perspective. Boston: Springer, 1986. 236 p.



*Poppeschi C., Charria G., Daniel A., Verney R., Retho M., Goberville E., Grossteffan E., Plus M.* Interannual Variability of the Initiation of the Phytoplankton Growing Period in Two French Coastal Ecosystems. *Biogeosciences Discussions*, 2022. P. 1–2. DOI: 10.5194/bg-2022-86.

*Radchenko I., Aksenova V., Voronov D., Rostanets D., Krasnova E.* Annual Dynamics of a Layered Phytoplankton Structure in a Meromictic Lagoon Partially Isolated from the White Sea. *Diversity*, 2023. V. 15. No. 1009. P. 1–28. DOI: 10.3390/d15091009.

*Rahuba A. V.* Hydroecological Studies of Water Bodies Using the “Chiton-Wave” Measuring and Computing System. *Information and Computing Technologies (ICT) and Their Applications*. Penza: RIO PGSKHA, 2012. P. 64–68 (in Russian).

*Sommer U., Gliwicz Z., Lampert W., Duncan A.* The PEG-Model of Seasonal Succession of Planktonic Events in Fresh Waters. *Archiv Fur Hydrobiologie*, 1986. No. 106. P. 433–471. DOI: 003-9136/86/0106-0433.

*Wang Q., Moreno-Martínez Á., Muñoz-Marí J., Campos-Taberner M., Camps-Valls G.* Estimation of Vegetation Traits with Kernel NDVI. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2023. V. 195. P. 408–417. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2022.12.019.

*Wang S., Zhang L., Huang C., Qiao N.* An NDVI-Based Vegetation Phenology is Improved to be More Consistent with Photosynthesis Dynamics Through Applying a Light Use Efficiency Model Over Boreal High-Latitude Forests. *Remote Sensing*, 2017. No. 9(695). DOI: 10.3390/rs9070695.

*Winder M., Cloern J.* The Annual Cycles of Phytoplankton Biomass. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B. Biological Sciences*, 2010. No. 365. P. 3215–3226. DOI: 10.1098/rstb.2010.0125.

## REFERENCES

*Alexandrov S. V., Bukanova T. V., Semenova A. S.* Dynamics of Bioproductivity of Ecosystems of the Baltic Sea Lagoons Under the Influence of Climate Change, Eutrophication and “Blooms” of Cyanobacteria. *Dynamics of Ecosystems in the Holocene. Proceedings of the Scientific and Practical Conference*, 2022. P. 20–25 (in Russian).

*Bashirova Ch. F.* Index NDVI for Vegetation Remote Monitoring. *Young Scientist*, 2019. No. 31(269). P. 30–31. Web resource: <https://help.onesoil.ai/ru/articles/5237493-как-отслеживать-индексы-вегетации-ndvi-msavi-ndre-и-др> (accessed 04.03.2025) (in Russian).

*Blaauboer M. C. T.* The Phytoplankton Species Composition and the Seasonal Periodicity in Lake Vechten from 1956–1979. *Hydrobiologia*, 1982. No. 95. P. 25–36.

*Gamier J., Billen G., Coste M.* Seasonal Succession of Diatoms and Chlorophyceae in the Drainage Network of the Seine River: Observations and Modeling. *Limnology and Oceanography*, 1995. No. 40. P. 750–765.

*Jaworska B., Dunalska J., Górniak D., Bowszys M.* Phytoplankton Dominance Structure and Abundance as Indicators of the Trophic State and Ecological Status of Lake Kortowskie (Northeast Poland) Restored with Selective Hypolimnetic Withdrawal. *Archives of Polish Fisheries*, 2014. No. 22. P. 7–15. DOI: 10.2478/aopf-2014-0002.

*Kudryavtseva E., Bukanova T., Kostianoy A., Melnik A., Alexandrov S., Krek A., Kanapatskiy T., Rusanov I., Ezhova E.* Influence of Circulation Processes on Cyanobacteria Bloom and Phytoplankton Succession in the Baltic Sea Coastal Area. *Ecologica Montenegrina*, 2023. No. 70. P. 164–182. DOI: 10.37828/em.2023.70.18.

*Li Z., Wu H., Duan S., Zhao W., Ren H., Liu X., Leng P., Tang R., Ye X., Zhu J., Sun Y., Si M., Liu M., Li J., Zhang X., Shang G., Tang B., Yan G., Zhou C.* Satellite Remote Sensing of Global

Land Surface Temperature: Definition, Methods, Products, and Applications. Reviews of Geophysics, 2023. No. 61(1). P. 1–18. DOI: 10.1029/2022RG000777.

*Lyashenko O. A., Radchenko A. P., Susloparova O. N.* Monitoring of Phytoplankton Status in the Luga Bay of the Gulf of Finland Under Natural and Anthropogenic Influence. Trudy VNIRO. Habitat of Aquatic Biological Resources, 2020. V. 179. P. 149–163 (in Russian).

*Makarevich P., Druzhkova E., Larionov V.* Primary Producers of the Barents Sea. Diversity of Ecosystems, 2012. P. 367–392. DOI: 10.5772/37512.

*Munawar M., Talling J. F.* Seasonality of Freshwater Phytoplankton: A Global Perspective. Boston: Springer, 1986. 236 p.

*Poppeschi C., Charria G., Daniel A., Verney R., Retho M., Goberville E., Grossteffan E., Plus M.* Interannual Variability of the Initiation of the Phytoplankton Growing Period in Two French Coastal Ecosystems. Biogeosciences Discussions, 2022. P. 1–2. DOI: 10.5194/bg-2022-86.

*Radchenko I., Aksenova V., Voronov D., Rostanets D., Krasnova E.* Annual Dynamics of a Layered Phytoplankton Structure in a Meromictic Lagoon Partially Isolated from the White Sea. Diversity, 2023. V. 15. No. 1009. P. 1–28. DOI: 10.3390/d15091009.

*Rahuba A. V.* Hydroecological Studies of Water Bodies Using the “Chiton-Wave” Measuring and Computing System. Information and Computing Technologies (ICT) and Their Applications. Penza: RIO PGSKHA, 2012. P. 64–68 (in Russian).

*Sommer U., Gliwicz Z., Lampert W., Duncan A.* The PEG-Model of Seasonal Succession of Planktonic Events in Fresh Waters. Archiv Fur Hydrobiologie, 1986. No. 106. P. 433–471. DOI: 003-9136/86/0106-0433.

*Titlyanova A. A.* Methodology and Methods for Evaluation of Net Primary Production and Building a Balance of Chemical Elements in Ecosystems. Theoretical Foundation and Experience of Ecological Monitoring. Moscow: Nauka, 1983. P. 63–76 (in Russian).

*Wang Q., Moreno-Martínez Á., Muñoz-Marí J., Campos-Taberner M., Camps-Valls G.* Estimation of Vegetation Traits with Kernel NDVI. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2023. V. 195. P. 408–417. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2022.12.019.

*Wang S., Zhang L., Huang C., Qiao N.* An NDVI-Based Vegetation Phenology is Improved to be More Consistent with Photosynthesis Dynamics Through Applying a Light Use Efficiency Model Over Boreal High-Latitude Forests. Remote Sensing, 2017. No. 9(695). DOI: 10.3390/rs9070695.

*Winder M., Cloern J.* The Annual Cycles of Phytoplankton Biomass. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B. Biological Sciences, 2010. No. 365. P. 3215–3226. DOI: 10.1098/rstb.2010.0125.