



УДК 1.6.19

DOI 10.52575/2712-7443-2024-48-3-382-404

Разработка методики определения площади эвтрофикации внутренних водоемов с использованием спутниковых данных

¹Евдокимов С.И., ²Штефуряк А.В.

¹Псковский государственный университет
Россия, 180000, г. Псков, ул. площадь Ленина, 2

²Псковский филиал ФГБНУ «ВНИРО»
Россия, 180007, г. Псков, ул. Максима Горького, 13
E-mail: serenia-8178@yandex.ru, Shtefuryak2011@mail.ru

Аннотация. В работе рассматривается методика определения площади эвтрофикации внутренних водоемов на основе данных сенсоров спутников серии Landsat за 2006 и 2023 годы. Выполнено сравнение спектральных величин красного, синего и ближнего инфракрасного каналов сенсоров Landsat (TM/ETM+/OLI), полученных на смежные даты съемки. Верификация эвтрофированных областей, выделенных по спутниковым данным, проведена на основе наземных данных со станций лимнологических наблюдений для изучения Чудско-Псковского озера. Выполнено исследование распространения эвтрофированных участков в зависимости от температуры поверхности воды с использованием информационного продукта MOD11A, создаваемого на основе снимков MODIS. С целью отделения «маски» водной поверхности озера для обеспечения дальнейшей обработки снимка методом данного исследования, использован спектральный водный индекс NDWI. Получены карты распределения областей, покрытых цветением цианобактерий по данным сенсоров спутников серии Landsat. На основе результатов применения методики была исследована динамика площади эвтрофикации Чудско-Псковского озера с мая по сентябрь за 2006 и 2023 годы. Максимальные значения площади эвтрофикации в Псковском озере наблюдались в 2006 и 2023 году в июне, в Чудском – в 2006 в сентябре, а в 2023 году – в июне. Интенсивное цветение в Псковском озере наблюдается с мая по июль, после чего площадь эвтрофикации постепенно снижается. В Чудском озере процесс развития сине-зеленых водорослей происходит позже, увеличение площади распространения цианобактерий наблюдается в августе – сентябре. Сопоставление пространственного распределения областей, покрытых цианобактериями, между спутниковыми и наземными данными по близким друг к другу датам показало среднюю силу связи (коэффициент корреляции 0,50–0,70).

Ключевые слова: эвтрофирование, дистанционное зондирование Земли, многоканальные спутниковые снимки, снимки Landsat, геоинформационные системы, NDWI, MOD11A1 Terra MODIS

Для цитирования: Евдокимов С.И., Штефуряк А.В. 2024. Разработка методики определения площади эвтрофикации внутренних водоемов с использованием спутниковых данных. Региональные геосистемы, 48(3): 382–404. DOI: 10.52575/2712-7443-2024-48-3-382-404

Development of a Methodology for Determining the Eutrophication Area of Inland Reservoirs Using Satellite Data

¹Sergey I. Evdokimov, ²Alina V. Shtefuryak

¹Pskov State University

2 Ploshchad Lenina St, Pskov 180000, Russia

²PSK branch of VNIRO Federal State Budgetary Institution

13 Maxim Gorky St, Pskov 180007, Russia

E-mail: serenia-8178@yandex.ru, Shtefuryak2011@mail.ru

Abstract. The study is devoted to the development of a methodology for determining the eutrophication area of inland reservoirs using Landsat satellite sensor data for 2006 and 2023. The spectral



characteristics of the red, blue, and near-infrared channels of Landsat sensors (TM/ETM+/OLI) for different survey dates were compared. To verify the eutrophied sites identified by satellite data, ground-based data from the limnological stations of Pskov-Peipsi Lake were used. The study of eutrophied areas distribution depending on the water surface temperature was carried out using the MOD11A information product based on MODIS images. The NDWI spectral water index was used to process the images and separate the lake's water surface. Maps showing the distribution of areas covered with cyanobacteria bloom according to Landsat sensors have been obtained. The dynamics of the eutrophication area of Lake Peipsi was analyzed from May to September for 2006 and 2023. The maximum values of the eutrophication area were noted in June 2006 and 2023 in Lake Pskov, and in September 2006 and June 2023 in Lake Peipsi. Cyanobacteria bloom in Lake Pskov is observed from May to July, after which the eutrophication area gradually decreases. In Lake Peipsi, blue-green algae development process occurs later, which may be due to a later warming of the water, the area with cyanobacteria expanding by August. A comparison of the spatial distribution of areas covered with cyanobacteria based on satellite and ground data for close dates showed an average relationship (correlation coefficient equaling 0.50–0.70).

Keywords: eutrophication, remote sensing of the Earth, multichannel satellite images, Landsat images, geoinformation systems, NDWI, MOD11A1 Terra MODIS

For citation: Evdokimov S.I., Shtefuryak A.V. 2024. Development of a Methodology for Determining the Eutrophication Area of Inland Reservoirs Using Satellite Data. *Regional geosystems*, 48(3): 382–404 (in Russian). DOI: 10.52575/2712-7443-2024-48-3-382-404

Введение

Чудско-Псковский водоем по площади водной поверхности (3555 км²) принадлежит к числу крупных пресноводных водоемов Европы и имеет статус трансграничного [Ястремкий, Ястремская, 2004; Тимм и др., 2012]. Озеро относится к бассейну Финского залива Балтийского моря и соединяется с ним короткой (77 км) рекой Нарвой. В связи с этим информация о состоянии его экосистемы имеет международное значение [Ястремский, 2010]. Учитывая народнохозяйственный и международный статус озера, вопросы, связанные с экологическим состоянием воды, требуют глубокой проработки.

Из-за большой площади озера полевой отбор проб для оценки степени эвтрофикации становится сложным и требует больших затрат времени и ресурсов на обработку и анализ результатов. Однако использование дистанционных методов оценки уровня эвтрофикации с помощью спутниковых снимков позволяет быстро и с минимальными затратами дополнить или заменить выездные исследования. Разработка методики для определения площади эвтрофикации водоемов с использованием мультиспектральных снимков и определяет актуальность исследования.

Процесс цветения фитопланктона, состоящего из одноклеточных водорослей, проявляется как сезонное изменение яркости водных бассейнов и обусловлен увеличением скорости деления клеток при благоприятных условиях. Цветение цианобактерий снижает привлекательность водоемов для отдыха и приводит к образованию токсинов в их водах [Вершинин, Орлова, 2008]. Также массовое размножение цианобактерий в водоемах может привести к негативным последствиям, таким как образование опасных биологически активных веществ и увеличение показателя водородного индекса воды, что способствует развитию вирусов и других возбудителей болезней у человека [Румянцев, Крюков, 2013]. Для обнаружения цветения фитопланктона и отслеживания его изменений во внутренних водоемах широко применяются методы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) [Siegel et al., 2013; Чурилова и др., 2016а, б; Werdell et al., 2018]. Основным пигментом, используемым для оценки скорости фотосинтеза и роста фитопланктона, является хлорофилл *a* [Bidigare et al., 1992; Behrenfeld, Falkowski, 1997; Suslin, Churilova, 2016]. Сканер спутников регистрирует сигналы, связанные с поглощением света различными пигментами фитопланктона: хлорофилл (ХЛ), каротиноиды (КР) и



фикобилипротеины (ФБП) [Rowan, 1989; Prezelin et al., 1991]. Эти пигменты определяют спектр света, который используют клетки для фотосинтеза. Поглощение хлорофилла *a* происходит на длинах волн приблизительно 438 и 678 нм, каротиноиды поглощают синезеленую область видимого спектра, а фикобилипротеины поглощают свет в диапазоне от 495 до 635 нм [Prezelin et al., 1991; Jeffrey, Vesk, 1997]. Хлорофилл *a* является основным фотосинтетическим пигментом, фикобилипротеины играют роль светопоглотителей в цианобактериях и красных водорослях, а каротиноиды выполняют функции поглощения световой энергии для фотосинтеза и защиты активного хлорофилла от разрушения кислородом под воздействием света [Bidigare et al., 1990; Demers et al., 1991].

Изменение концентрации пигментов в клетках микроводорослей и цианобактерий в зависимости от спектрального состава освещения рассматривается согласно теории комплементарной хроматической адаптации, предложенной Энгельманом и Гайдуковым в 1902 году для цианобактерий (82). Согласно этой теории, уровень пигментов увеличивается в тех клетках, чьи пигменты поглощают свет определенного спектра, и уменьшается в клетках, где пигменты не подвергаются поглощению. Например, под воздействием зеленого света цианобактерии синтезируют красный пигмент ФЭ (фикоэритрин), а под красным светом – синий пигмент ФЦ (фикоцианин) [Engelmann, 1902].

Основные характеристики спектров поглощения света пигментами фитопланктона включают показатели поглощения света в синем и красном максимумах спектров на длинах волн 438 и 678 нм соответственно [Hoepffner, Sathyendranath, 1992; Suzuki et al., 1998]. Поглощение света в указанных диапазонах обусловлено основным светопоглощающим пигментом водорослей ХЛ *a* и вспомогательными пигментами КР. Кроме того, спектры поглощения света пигментами цианобактерий содержат дополнительные пики поглощения на длинах волн, соответствующих поглощению пигментов ФЭ (550) и ФЦ (620).

Так, используя спутниковые данные в видимом диапазоне, можно систематически выявлять области цветения цианобактерий, которые существенно воздействуют на поглощение солнечного излучения и обладают характерными спектральными особенностями. На сегодняшний день существует несколько методов выявления цианобактерий, описанных в различных работах, они основаны на измерениях отражательной способности в одном или нескольких оптических каналах, а также на особенностях их пространственной структуры [Kutser et al., 2006; Kahru et al., 2007; Blondeau-Patissier et al., 2014; Карабашев, Евдошенко, 2015; Lavrova, Mityagina, 2016].

Из-за положительной плавучести цианобактерий и большой биомассы в поверхностном слое их яркость значительно выше, чем у чистой воды, особенно в ближнем инфракрасном диапазоне, где вода сильно поглощает свет [Blondeau-Patissier et al., 2014]. Чистая вода поглощает относительно меньшее количество приходящего излучения в начале видимого диапазона в комплексе с направленностью изменения рассеяния молекулами воды. Это обуславливает высокий коэффициент пропускания с максимумом в синезеленой части спектра.

Увеличение концентрации хлорофилла *a* в клетках цианобактерий также приводит к увеличению поглощения света в синей части спектра в областях цветения по сравнению с областями повышенной мутности воды (с взвесью минерального происхождения). Поэтому на композитных изображениях (*RGB*) при использовании различных каналов для воспроизведения «естественного цвета» области цветения имеют более насыщенный зеленый цвет. Скопление цианобактерий в областях дивергенции течений приводит к появлению характерных нитчатых структур в яркости [Алескерова и др., 2018].

В связи с тем, что представители синезеленых водорослей, вызывающих цветение воды, в своем распределении в водной толще тяготеют к поверхностным горизонтам, заметную окраску воде они придают уже при малых концентрациях, что делает возможным их изучение с помощью дистанционного зондирования Земли [Ястремский, 2016]. Современные средства дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) позволяют проводить оперативную полномасштабную съемку больших территорий с высокой детализацией снимков. Это позволяет осу-

ществлять непрерывный мониторинг. Кроме того, с использованием архивных данных космической съемки можно проводить ретроспективную оценку площади эвтрофированных участков, что помогает определить экологическую ситуацию и моделировать ее тенденции.

Цель – разработать методику определения площади эвтрофикации водоемов с использованием данных дистанционного зондирования Земли.

Для достижения поставленной цели нами были решены следующие задачи:

- разработка методики вычисления площади эвтрофикации с использованием спутниковых снимков;
- сравнение спектральных величин, используемых в исследовании (красного, синего и ближнего инфракрасного) каналов сенсоров *Landsat* (TM/ETM+/OLI);
- построение карт распределения эвтрофированных зон по данным сенсоров спутников серии *Landsat*;
- верификация эвтрофированных зон, выделенных по спутниковым данным, фактическими данными;
- анализ динамики площади эвтрофикации.

Объекты и методы исследования

В качестве исходных данных в работе использовались многоканальные спутниковые снимки с пространственным разрешением 30 м на пиксель со спутников *Landsat 5 TM* и *Landsat 8 OLI*. Из архива Геологической службы США были выбраны преимущественно безоблачные снимки за 2006 и 2023 гг. (2006 год был выбран в соответствии с наличием одних и тех же или близких дат к снимкам 2023 года, выполненных в мае – сентябре, некоторые месяцы не включены из-за отсутствия безоблачных снимков).

Несмотря на то, что сенсоры *Landsat TM* и *OLI* близки по характеристикам, они отличаются по ширине спектральных диапазонов и по радиометрическому разрешению, что диктует необходимость сравнения различий (рис. 1).

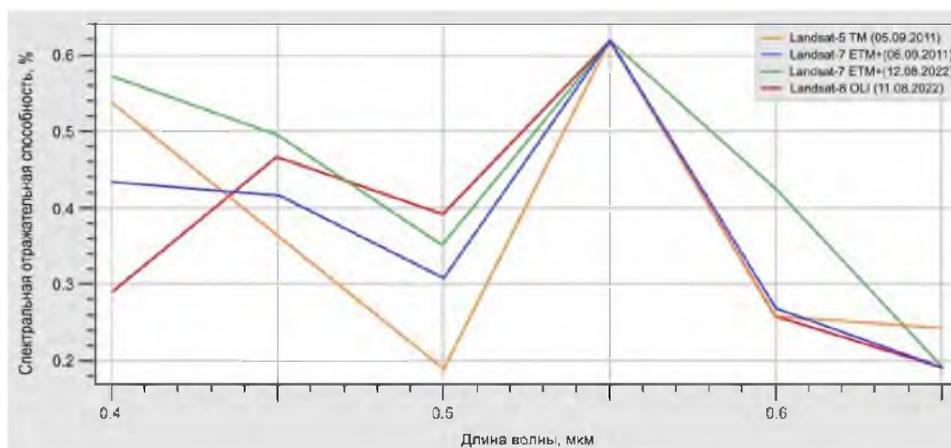


Рис. 1. Средние спектры отражательной способности цианобактерий для различных сенсоров Landsat

Fig. 1. Average reflectivity spectra of cyanobacteria for various Landsat sensors

Сравнение выполняли по набору изображений *Landsat* сенсоров *TM/ETM+/OLI* близких дат съемки (разница между сравниваемыми парами – 1 день) (табл. 1). Отсутствие возможностей для прямых сопоставлений съемок сенсоров *TM/OLI* определяет необходимость сравнения исследуемых величин через значения сенсора *ETM+*.



Таблица 1
 Table 1

Материалы сравниваемых съемок Landsat TM/ETM+/OLI
 Materials of the compared Landsat TM/ETM+/OLI surveys

Сенсоры	Дата
Landsat-5 TM	05.09.2011
Landsat-7 ETM+	06.09.2011 12.08.2022
Landsat-8 OLI	11.08.2022

Сходство спектральных величин для используемых каналов (*RED*, *BLUE*, *GREEN*) на сценах сенсоров *TM*, *ETM+* и *OLI* рассчитывали относительно сенсора *ETM+* с использованием критерия относительной процентной разницы (1) (англ. *relative percentage difference* – *RPD*) [Huang et al., 2013]:

$$RPD = \frac{\rho_i - \rho_{L7ETM+}}{\rho_{L7ETM+}} \times 100, \quad (1)$$

где ρ_i и ρ_{L7ETM+} – соответствующие значения для отдельных каналов сравниваемых спутниковых изображений сенсоров *i* и *ETM+*.

Для анализа термического режима поверхности водоемов использовался информационный продукт *6.1 MOD11A1*, создаваемый на основе снимков *MODIS*. Эти изображения предоставляют данные о средней температуре земной поверхности за восемь дней, исключая дни с облачностью. Изображения *MOD11A1* имеют размер 1200 x 1200 пикселей с пространственным разрешением 1 км и представлены в синусоидальной проекции. Сначала необходимо преобразовать изображения из синусоидальной проекции в универсальную поперечную проекцию Меркатора *WGS-84/UTM*. Затем полученные изображения дневных температур поверхности *MOD11A1* обрезаются по «маске» водоема. Данные о температуре поверхности суши представлены в градусах Кельвина. Для преобразования значений *MOD11A1* в градусы Цельсия используется формула (2), источником которой послужило официальное руководство пользователя *Modis LST*³:

$$T(^{\circ}C) = DN * 0.02 - 273.15, \quad (2)$$

где *DN* – значения исходных яркостей, представленных в *MOD11A1*.

На этапе предобработки данных производилась коррекция изображений для учета атмосферных и других возмущений [Jang et al., 2014; Viso-Vázquez et al., 2021]. Обработка данных производилась в среде *QGIS 3.22.15* с применением модуля *Semi-Automatic Classification Plugin (SCP)*. Далее, используя калькулятор растров, был рассчитан нормализованный разностный индекс воды (*NDWI*), который широко применяется для обнаружения водных объектов по космическим снимкам [Xu, 2006]. Расчет *NDWI* проводили по формуле (3):

$$NDWI = \frac{(NIR - SWIR)}{(NIR + SWIR)}, \quad (3)$$

где *NIR* – канал ближнего инфракрасного спектра отражения, *SWIR* – коротковолновый инфракрасный канал.

При дальнейшем извлечении признаков, характеризующих эвтрофикацию озера, на основе предобработанных данных было учтено, что сине-зеленое свечение, характерное для сине-зеленых бактерий и микроводорослей, хорошо видно на снимках с натуральной цветопередачей (*RGB*), а также с помощью комбинации каналов *Landsat 5 (4-5-1)* и *Landsat 8 (5-6-2)*, где вода и растительность дают очень сильное отражение [Бабич и др., 2023] (рис. 2).

³Руководство пользователя *Modis LST*. Электронный ресурс. URL: https://ices.eri.ucsb.edu/modis/LstUsrGuide/usrguide_mod11.html#vzds (дата обращения: 04.02.2024).

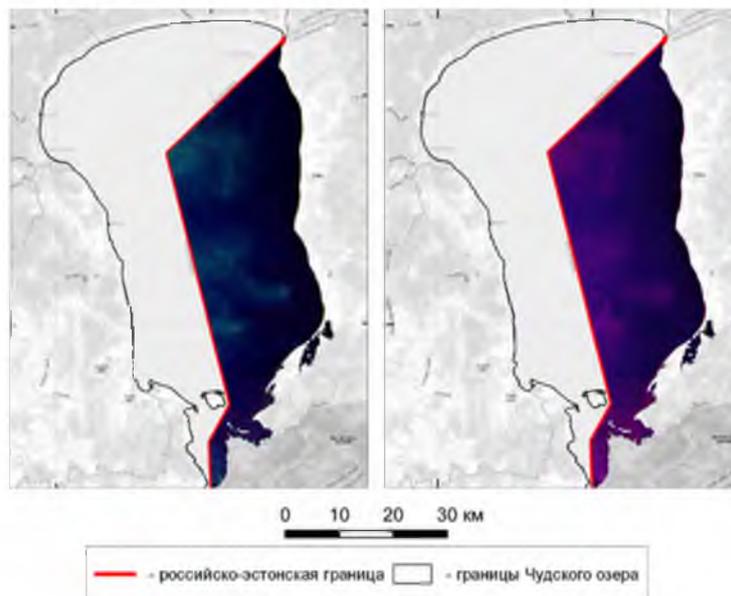


Рис. 2. Снимки Чудского озера Landsat 8 RGB (слева) и комбинации каналов 5-6-2 от 13.07.2023 (справа)
Fig. 2. Images of Lake Peipsi Landsat 8 RGB (left) and a combination of channels 5-6-2 from 07/13/2023 (right)

Однако для обнаружения областей цветения цианобактерий лучше всего использовать цветосинтезированные изображения с естественной передачей цвета. В периоды длительной теплой, солнечной и безветренной погоды цианобактерии сгруппировываются и поднимаются к поверхности, образуя скопления на поверхности или под водой. На спутниковых изображениях цианобактерии выглядят как яркие нитевидные полосы или целые скопления. Цвет этих пятен зависит от стадии развития водорослей и может варьировать от ярко-зеленого до буровато-коричневого (рис. 3).

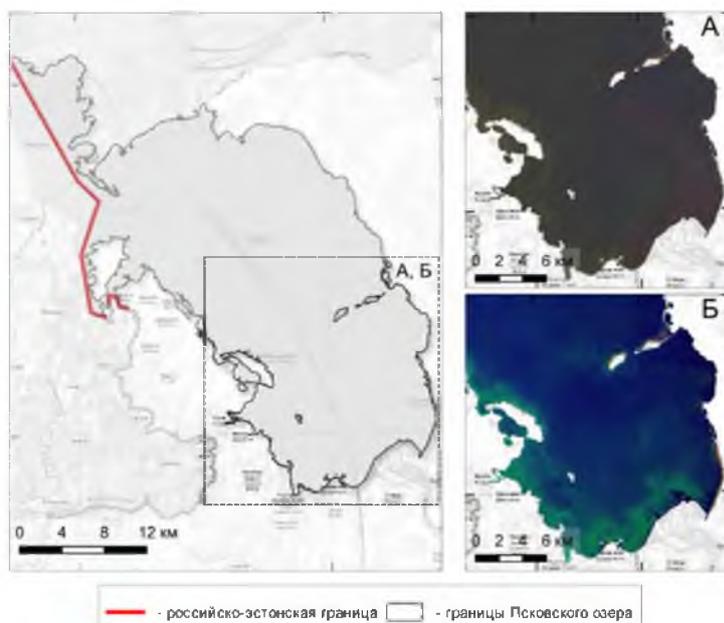


Рис. 3. Снимки Псковского озера Landsat 8 RGB от 24.08.2015 (А) и 06.05.2016 (Б)
Fig. 3. Images of Pskov Lake Landsat 8 RGB from 08/24/2015 (А) and 05/06/2016 (Б)

Всего было обработано 14 спутниковых снимков. Далее производится классификация снимков, то есть разделение пикселей, соответствующих и не соответствующих синезеленому свечению. Для этого используется специальный алгоритм обработки изображений – метод «пиксели в точки» (рис. 4).



Рис. 4. Схема алгоритма вычисления площади эвтрофикации
Fig. 4. Diagram of the algorithm for calculating the eutrophication area

Для данного вычисления площади необходимо подобрать такую комбинацию каналов, на которой будет четко отображаться распространение сине-зеленых бактерий и микроводорослей [Даниличева и др., 2022а, б; Даниличева, Ермаков, 2023]. Далее с помощью инструмента *SAGA «Raster values to points»* преобразовываем пиксели в точечно-векторную форму, используя информацию из растрового изображения, после чего выбираем их по расположению для дальнейшей геообработки. Для выделения точек по расположению использовалась «водная маска» Псковского озера на основе вычисленного индекса *NDWI*. С помощью инструмента «Агрегировать» происходит группировка выделенных точек, соответствующих наличию сине-зеленых бактерий и микроводорослей (рис. 5).

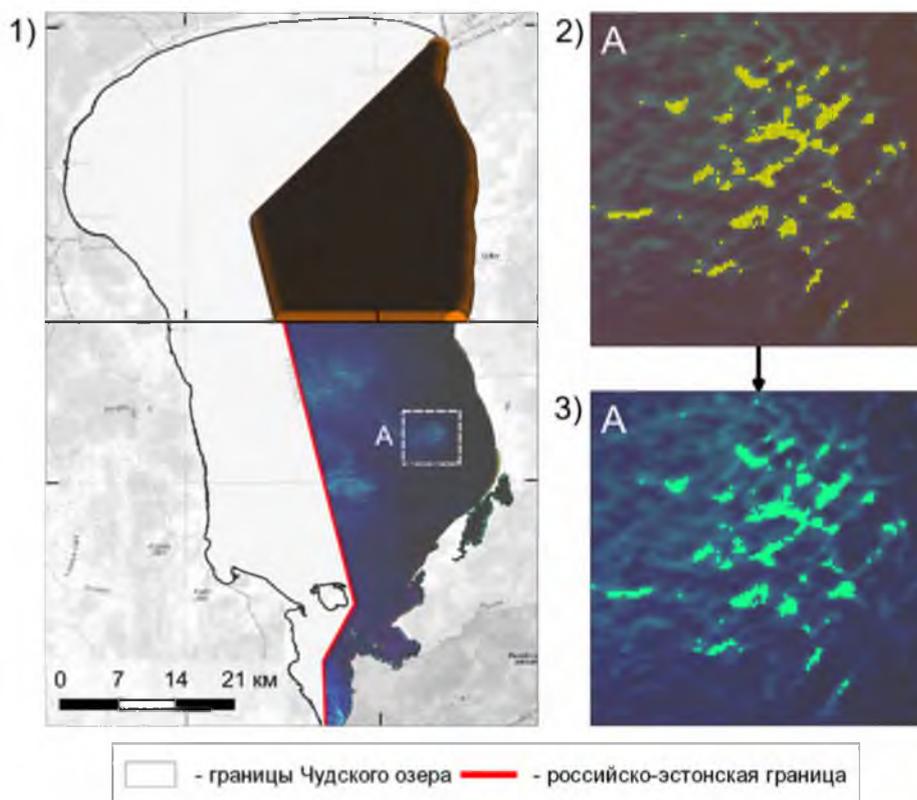


Рис. 5. Основная часть обработки изображения с помощью метода «пиксели в точки»:
1 – преобразование значений растра в точки; 2 – сгруппированные точки, посредством инструмента «Агрегировать»; 3 – полученные области интенсивного цветения цианобактерий
Fig. 5. The main part of image processing using the "pixels to points" method: 1 – converting raster values to points; 2 – grouped points using the aggregate tool; 3 – obtained areas of intense cyanobacteria bloom

Данный метод классификации спутниковых снимков основан на группировке пикселей схожей яркости в растрах и присвоении им одинаковых значений. После проделанных операций с помощью калькулятора полей рассчитывается площадь путем умножения количества точек на разрешение снимка. Для визуализации изменяется стиль полученного изображения (рис. 6).

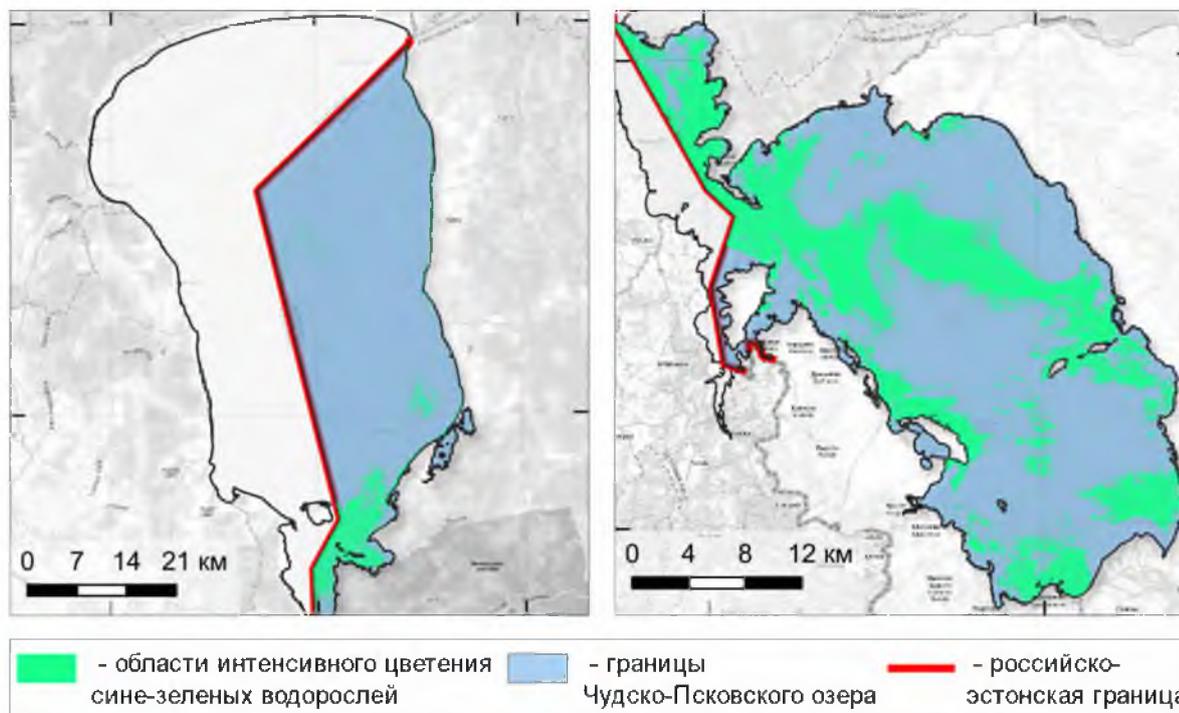


Рис. 6. Зоны эвтрофикации Чудского (слева) и Псковского (справа) озер 11 июня 2023 года
Fig. 6. Eutrophication zones of Lake Peipsi (left) and Lake Pskov (right) lakes on June 11, 2023

Для подтверждения отсутствия или наличия эвтрофированных зон в озере готовили изображения интерполированных значений с наличием цианобактерий, характеризующих эвтрофированные зоны для периода сравниваемых лет. В качестве источника наземных данных использовались данные со станций лимнологических наблюдений для изучения Чудско-Псковского озера, предоставленные Псковским филиалом ФГБНУ «ВНИРО». Однако не все данные удалось подтвердить, поскольку наземные наблюдения отличались от спутниковых на период от 1 до 18 дней (табл. 2).

Таблица 2
Table 2

Использованные материалы спутниковых и наземных данных
Satellite and ground data materials used

Дата	
Спутниковые данные	Наземные наблюдения
26.05.2023	23–24.05.2023
11.06.2023	28.06.2023
13.07.2023	31.07.2023
22.09.2023	02.10.2023
11.05.2006	16.05.2006
12.06.2006	13–14.06.2006
05.07.2006	16.07.2006
16.09.2006	14–18.09.2006

Данный метод определения зоны эвтрофикации имеет свои плюсы и минусы, которые следует учитывать при его использовании.



Одним из главных преимуществ является его способность представить данные в формате точек, что облегчает их анализ и интерпретацию. Вместо того чтобы рассматривать каждый пиксель отдельно, метод объединяет идентичные по цвету пиксели в группы. Такой подход значительно сокращает объем данных и позволяет выполнять дальнейшую геообработку.

Еще одним преимуществом метода является его способность работать с мультиспектральными снимками. Спутниковые снимки часто содержат информацию о различных диапазонах электромагнитного спектра, таких как видимый свет, инфракрасное излучение и радиоволны [Fu-Liu et al., 2001; Zhang et al., 2021]. Используя метод, исследователи могут анализировать каждый из этих диапазонов отдельно и затем объединить полученные данные для создания общей картины [Абросимов, Дворкин, 2009; Кутузов, 2016].

Метод может быть использован для различных задач, например, для подсчета пород деревьев на исследуемой территории.

Однако метод также имеет свои недостатки. Такой подход подразумевает некоторую степень субъективности при определении параметров группировки пикселей в точки. Результаты анализа могут зависеть от интерпретации пользователем мультиспектрального снимка. Это может привести к некоторой степени неопределенности и потребовать дополнительной проверки результатов. Поэтому, на данном этапе использования метода необходимо верифицировать наличие эвтрофирования фактическими данными.

Метод требует наличия актуальных и качественных спутниковых снимков, преимущественно без облаков.

Кроме того, следует учитывать ограниченность информации, получаемой с помощью ДЗЗ. Спутниковые снимки дают возможность изучить только поверхностные процессы эвтрофикации озера, в то время как многие факторы, такие как подводные образования или состав донного осадка, могут оставаться незамеченными. Поэтому использование только этого метода может быть недостаточным для полного понимания проблемы эвтрофикации озера.

Результаты и их обсуждение

В Чудско-Псковском озере цветение воды из-за сине-зеленых водорослей отмечается с начала XX века [Лаугасте и др., 2012]. Наибольшее число таксонов сине-зеленых водорослей (77) обнаружено в южной мелководной и высокоэвтрофной части водоема – Псковском озере и несколько меньше в Чудском (72) [Ястремский, 2010]. Роль сине-зеленых водорослей в Псковском озере значительно выше, чем в Чудском.

Сравнение величин относительной процентной разницы (*RPD*) по используемым каналам Landsat демонстрирует общие закономерности проявления отклонений КСЯ для разных сенсоров. Прямое сравнения снимков *TM* и *OLI* из-за отсутствия перекрытия в сроках получения снимков выполнить не удастся. Однако сопоставить различия сенсоров можно через *ETM+* [Елсаков, 2021].

Сравнение средних по снимку величин *RPD* разных сенсоров позволило установить различия для исследуемых каналов:

– для канала *NIR*: $OLI > ETM+$ (в среднем на 0,6 %); $ETM+ > TM$ (0,5 %) $\Rightarrow OLI > TM$ (суммарно на 1,1 %);

для канала *Red*: $OLI > ETM+$ (2,7 %); $ETM+ < TM$ (1 %) $\Rightarrow OLI > TM$ (суммарно на 1,7 %);

для *Blue*: $OLI > ETM+$ (1,8 %); $ETM+ < TM$ (2,8 %) $\Rightarrow OLI < TM$ (суммарно на 1 %).

Максимальные различия отмечены для *Blue*-канала между сценами *ETM+* и *TM*, минимальные – для *NIR*-канала (0,5–0,6 %). Суммарно наименее выраженные различия между сенсорами отмечены для *Blue* и *NIR*-каналов, несмотря на высокие различия диапазонов для *NIR* канала.

Результаты сравнительного анализа площадей зоны эвтрофикации Чудского-Псковского озера в период май – сентябрь за 2006 и 2023 гг. показали, что в Псковском озере максимальные значения площади эвтрофикации наблюдались в 2006 и 2023 году в июне. В Чудском же озере максимальные значения площади эвтрофикации достигали в сентябре 2006 года, а в 2023 году – в июне (табл. 3). Данной вспышке вегетации цианобактерий в июне может способствовать ряд факторов, среди которых глобальное потепление и изменение климата, антропогенное загрязнение, а также способность цианобактерий адаптироваться к различным условиям среды [Сухаревич, Поляк, 2020]. В 2023 году средняя температура в мае составила 13,4 °С, что на 2,5 °С больше, чем в 2006 году, где среднемесячная температура была 10,9 °С. Рост температуры непосредственно мог способствовать развитию цианобактерий. Для более точного объяснения возникновения данной вспышки роста цианобактерий необходимо рассматривать совместное влияние температуры и концентрации биогенных веществ.

Таблица 3
Table 3

Площади эвтрофикации и степени распространения цианобактерий от общей площади водоема
The area of eutrophication and the degree of spread of cyanobacteria from the total area of the reservoir

Месяц	Чудское озеро		Псковское озеро	
	Площадь эвтрофикации, км ²	Степень распространения цианобактерий от общей площади водоема, %	Площадь эвтрофикации, км ²	Степень распространения цианобактерий от общей площади водоема, %
2023 год				
V	29,30	1,02	160,20	22,60
VI	86,89	3,05	236,49	33,36
VII	52,95	1,86	–	–
IX	53,19	1,87	96,05	13,55
2006 год				
V	5,84	0,21	56,06	7,91
VI	16,74	0,59	156,27	22,04
VII	22,39	0,79	–	–
IX	28,49	1,00	63,99	9,03

Площадь Чудского озера составляет 2846 км², степень распространения цианобактерий за период исследования в 2006 году колеблется от 0,21 до 1 %, в 2023 году – от 1,02 до 3,05 %. В среднем степень покрытия площади поверхности водоема сине-зелеными водорослями в 2023 году по сравнению с 2006 годом увеличилась на 1,3 %. Площадь Псковского озера – 709 км², степень распространения областей, покрытых цианобактериями, от общей площади водоема находится в диапазоне от 7,91 до 22,04 % в 2006 году, от 13,55 до 33,36 % в 2023 году. По сравнению с 2006 годом в среднем степень распространения цианобактерий на поверхности водоема в 2023 году увеличилась на 10,87 %.

Анализируя гистограммы, можно заметить, что интенсивность цветения воды из-за сине-зеленых водорослей значительно изменяется по сезонам в зависимости от погодных и гидрохимических условий. Обильное цветение в Псковском озере наблюдается с мая по июль, после чего площадь эвтрофикации постепенно снижается. Чудское озеро расположено севернее и является более глубоководным, что приводит к увеличению продолжительности его нагревания и сдвигу процессов развития сине-зеленых водорослей. Таким образом, в Чудском озере увеличение площади распространения цианобактерий наблюдается в августе – сентябре (рис. 7).

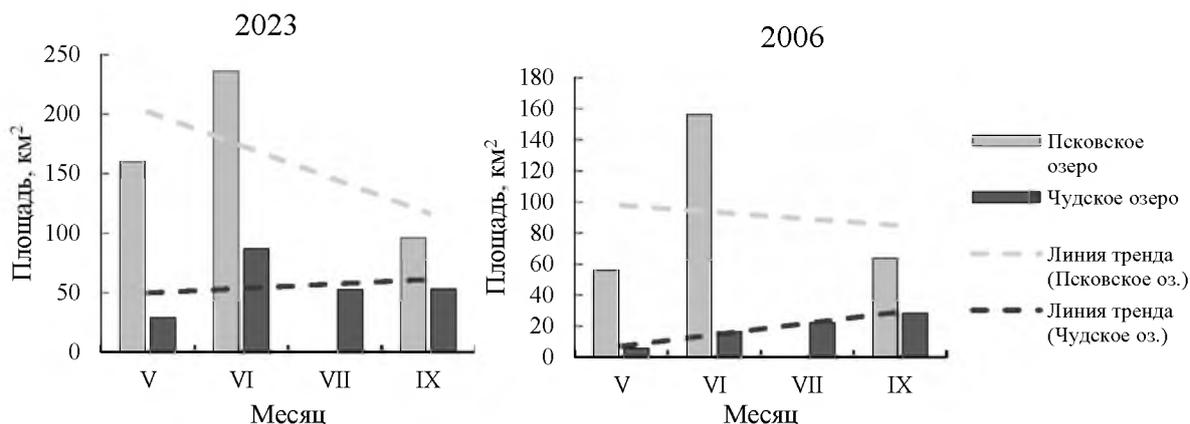


Рис. 7. Динамика площади эвтрофикации озер в 2006 и 2023 годах в зависимости от месяца
Fig. 7. Dynamics of the lake eutrophication area in 2006 and 2023, depending on the month

Одним из факторов, оказывающих существенное воздействие на процесс эвтрофикации, является температурный режим воды. Он непосредственно влияет на физико-химические свойства и биологические процессы. Использование данных дистанционного зондирования Земли позволяет отслеживать температурный режим воды в Чудско-Псковском водоеме. Эти данные предоставляют информацию о поверхностной температуре воды с высоким пространственным и временным разрешением.

Для развития сине-зеленых водорослей благоприятна температура от +20 °С до +34 °С; температура +29 °С является оптимальной для их роста [Lurling et al., 2013].

Цветению воды в Чудско-Псковском озере способствуют следующие благоприятные факторы, складывающиеся в летний период:

- а) повышенная освещенность и температура воды;
- б) интенсивный ход процессов минерализации отмершего фитопланктона, обеспечивающих новое пополнение воды минеральными слоями;
- в) хорошие прогреваемость воды и ее перемешиваемость даже при умеренном ветре из-за мелководности озера [Ястремский, 2016].

Как уже упоминалось, большое влияние на состояние биогенной пленки из цианобактерий оказывает ветер. Ветровой режим в Чудско-Псковском водоеме характеризуется ветрами со скоростью от 5 до 20 м/с [Тимм и др., 2012]. При скорости ветра больше 8–10 м/с пленка разрушается, скопления водорослей на поверхности не наблюдается или появляется возможность проследить перенос водорослей ветром, как это можно увидеть в Псковском озере 11.06.2023 [Лаврова и др., 2014]. Пространственное распределение водорослей в Чудско-Псковском озере зависит главным образом от силы и направления ветра, а также температуры воды.

В целом наибольшее скопление цианобактерий отмечается в южной части Псковского озера, находящейся под влиянием вод реки Великой, вблизи Талабских островов и вдоль береговой линии. Также скопление биомассы цианобактерий происходит в зонах конвергенции течений (рис. 8). В основном зоны, покрытые цианобактериями, соответствуют наиболее мелководным и хорошо прогретым местам (рис. 9).

Сравнительный анализ эвтрофикации Чудского и Псковского озер позволяет выявить различия в динамике развития этого процесса. Одно из отличий между Чудским и Псковским озерами заключается в темпах развития эвтрофикации. В случае Чудского озера площадь эвтрофической зоны начинает увеличиваться только к августу, то есть более поздней части летнего периода. Это может быть связано с более поздним прогреванием воды. При этом, водоросли образуют плотный тонкий слой, концентрирующийся в одном месте – в южной части Чудского озера, которая является мелководной, часто с повышенными значениями температур (рис. 10, 11). Температурный контраст между районами с плавающими цианобактериями и окружающими районами может достигать 4 °С.

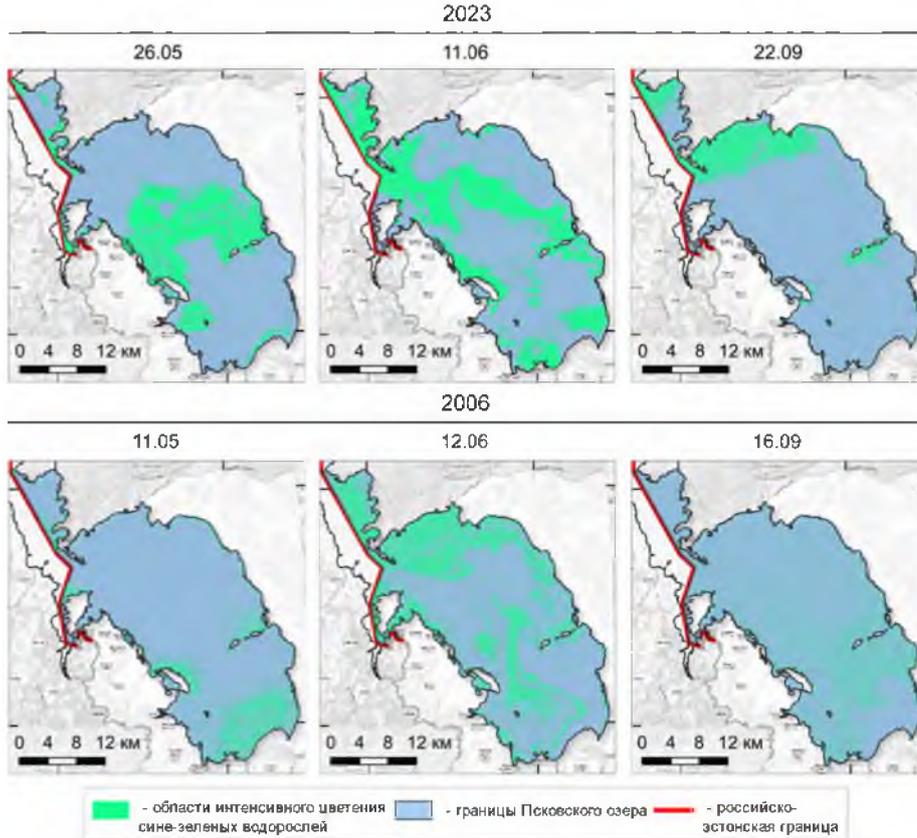


Рис. 8. Зоны эвтрофикации Псковского озера в зависимости от месяца в 2023 и 2006 гг.
Fig. 8. Eutrophication zones of Lake Pskov depending on the month in 2023 and 2006

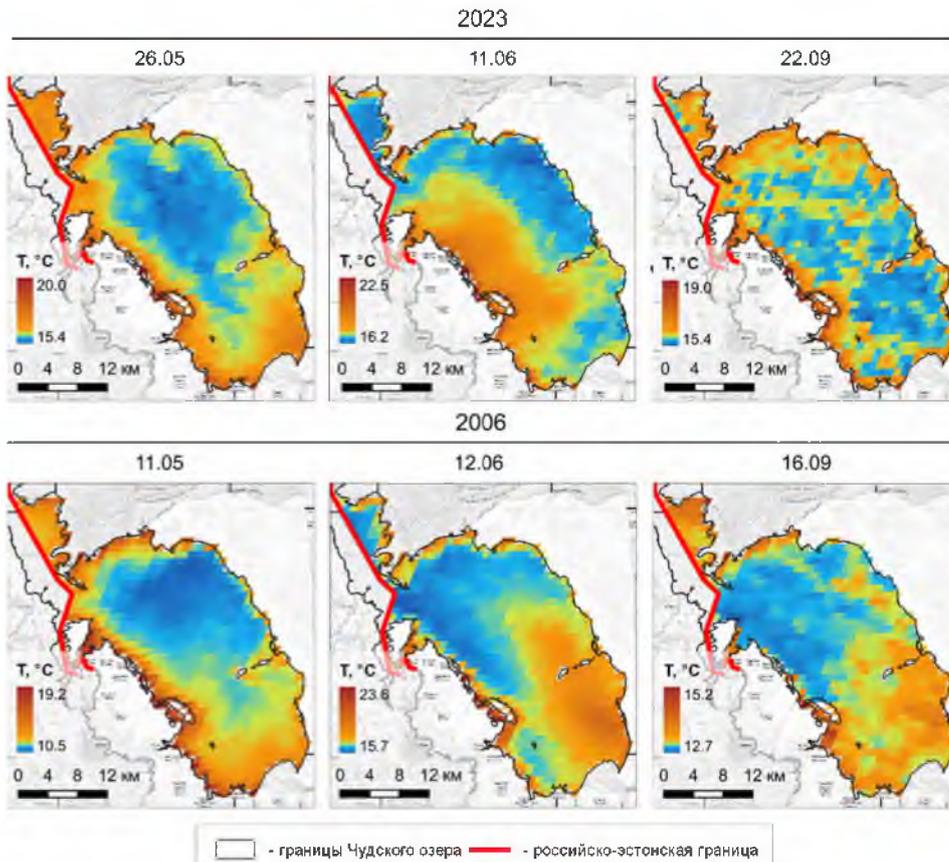


Рис. 9. Температура поверхности воды Псковского озера по данным MOD11A1 Terra MODIS
Fig. 9. Surface temperature of the Pskov Lake water according to MOD11A1 Terra MODIS data

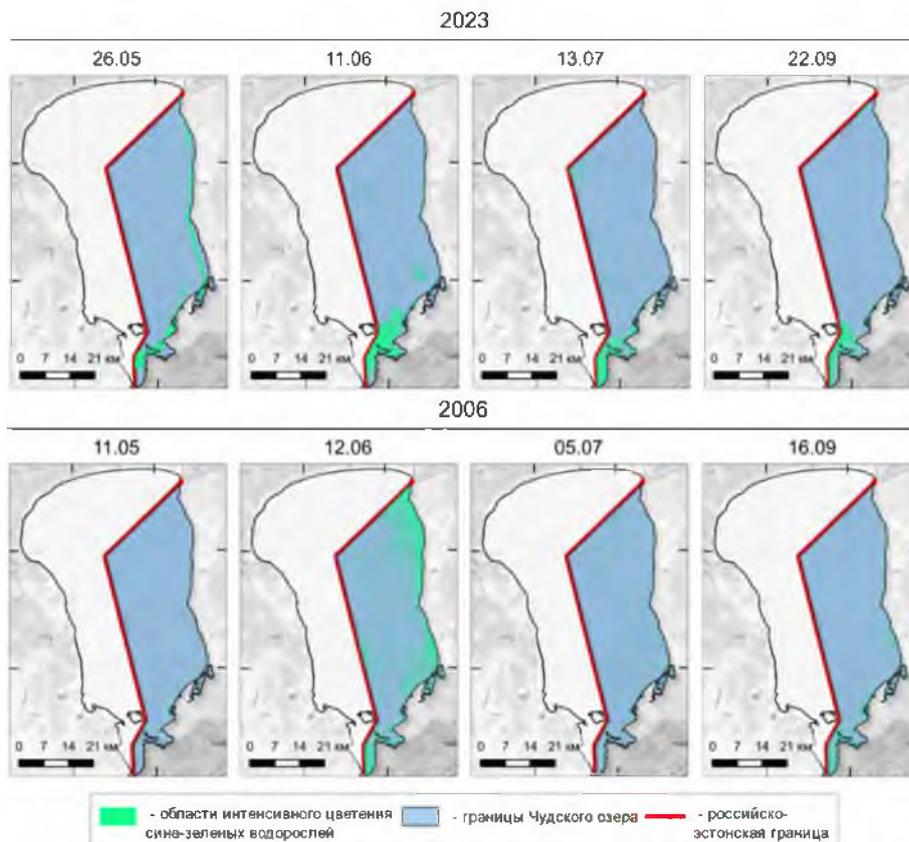


Рис. 10. Зоны эвтрофикации Чудского озера в зависимости от месяца в 2023 и 2006 гг.
 Fig. 10. Eutrophication zones of Lake Peipsi depending on the month in 2023 and 2006

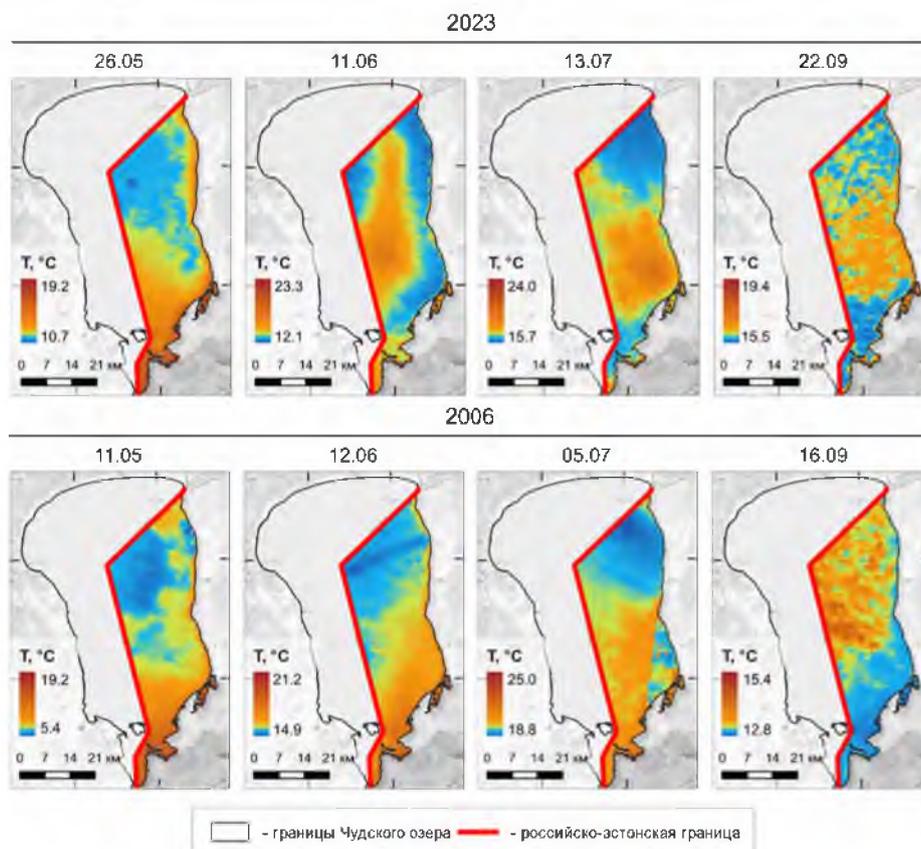


Рис. 11. Температура поверхности воды Чудского озера по данным MOD11A1 Terra MODIS
 Fig. 11. Water surface temperature of Lake Peipsi according to MOD11A1 Terra MODIS data

В случае Псковского озера процесс эвтрофикации начинается уже с конца мая – начала летнего периода. Причиной таких ранних сроков может служить большая нагрузка питательными веществами из прилегающих территорий или другие факторы, способствующие активному развитию сине-зеленых водорослей [Gladyshev, Gubelit, 2019; Tammeorg et al., 2020].

Для верификации наличия областей интенсивного цветения цианобактерий, выявленных на спутниковых снимках, необходимо сравнить спутниковые данные с достоверно выявленными участками эвтрофикации по наземным данным. Для этого, используя данные с лимнологических станций Чудско-Псковского озера, прогнозировались места наличия цианобактерий посредством интерполяции. Затем рассчитывался коэффициент корреляции между полученными фактическими данными и спутниковыми изображениями. В результате обработки данных ДЗЗ можно заметить, что методика исследования позволяет выделить области с наиболее интенсивным цветением сине-зеленых водорослей, образующих плотный слой (рис. 12). Наиболее разреженные области, поглощающие меньшее количество солнечной радиации, вследствие чего имеют менее значительное отражение света в ИК-диапазоне, выделяются с трудом.

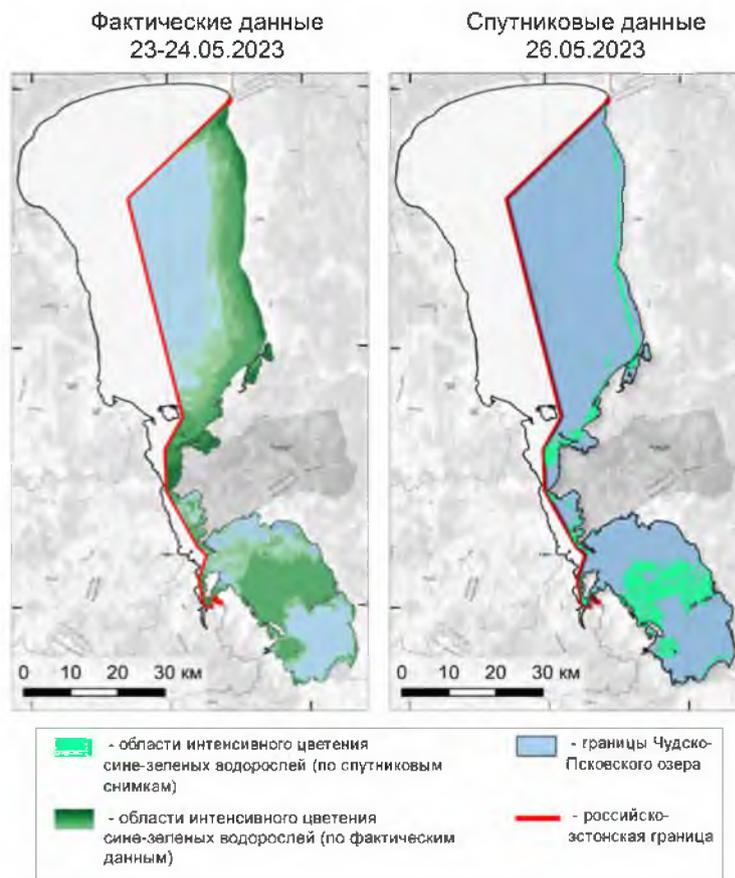


Рис. 12. Пространственное распределение областей, покрытых цианобактериями по наземным (слева) и спутниковым (справа) данным

Fig. 12. Spatial distribution of areas covered with cyanobacteria according to ground data (left) and satellite data (right)

По результатам обработки данных при сопоставлении пространственного распределения областей, покрытых цианобактериями, между спутниковыми и фактическими изображениями по близким друг к другу датам показана средняя (заметная) сила связи (коэффициент корреляции 0,50–0,70), что позволяет использовать спутниковые снимки и данный метод исследования для определения площадей эвтрофикации внутренних водоемов (табл. 4).



Таблица 4
Table 4

Коэффициенты корреляции между наземными и спутниковыми данными
Correlation coefficients between terrestrial and satellite data

Дата (спутниковые данные/фактические данные)	Коэффициент корреляции	
	Чудское озеро	Псковское озеро
2023 год		
26.05/23-24.05	0,53	0,60
11.06/28.06	0,32	0,25
13.07/31.07	0,21	–
22.09/02.10	0,36	0,25
2006 год		
11.05/16.05	0,70	0,69
12.06/13-14.06	0,68	0,61
05.07/16.07	0,30	–
16.09/14-18.09	0,65	0,70

В Псковском озере по сравнению с Чудским озером интенсивность цветения воды выше. Это объясняется несколькими факторами.

Во-первых, географическое положение озер. В Псковском озере, как упоминалось выше, на развитие цианобактерий имеют влияние воды реки Великой.

Во-вторых, объем воды в Псковском озере меньше, чем в Чудском озере. Это приводит к более высокой концентрации питательных веществ на единицу объема и обеспечивает лучшие условия для размножения сине-зеленых водорослей.

Наконец, климатические условия также играют роль в интенсивности цветения. В районе Чудского озера климат более холодный и непредсказуемый, что снижает возможность длительного и интенсивного цветения. В то же время, климатические условия в районе Псковского озера более благоприятные для развития цианобактерий.

Исследования, проведенные на основе спутниковых данных на Псковском, Чудском озерах, позволяют сделать вывод, что не всегда максимальная температура поверхности воды соответствует максимальной площади эвтрофикации (рис. 13).

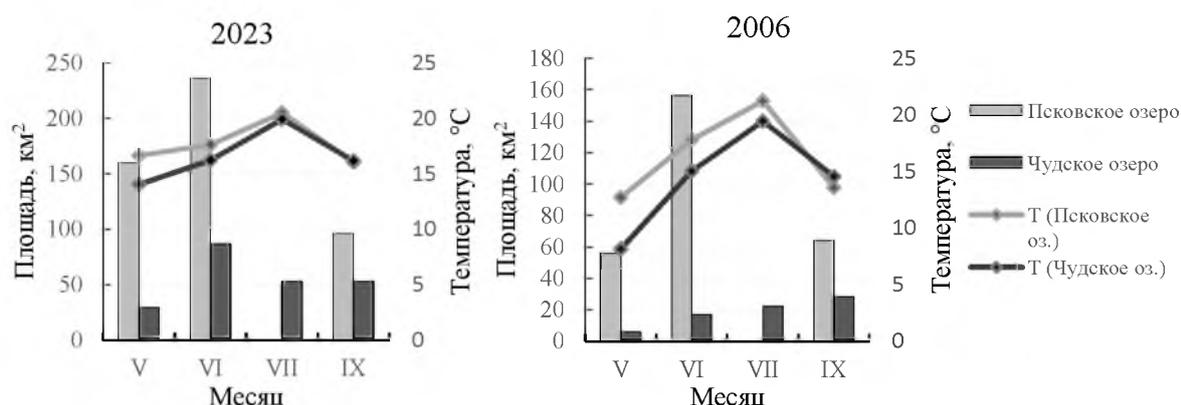


Рис. 13. Соотношение площади эвтрофикации (км²) и средней температуры поверхности воды (°C) по месяцам в Псковском, Чудском озерах за 2006 и 2023 гг.

Fig. 13. The ratio of the eutrophication area (km²) and the average water surface temperature (°C) by month in Lake Pskov and Lake Peipsi for 2006 and 2023

Например, в летний период, когда температура поверхности воды достигает своего максимума, площадь эвтрофикации может быть как высокой (например, из-за большого количества аграрных стоков), так и низкой (если происходит активное естественное очищение озера).

Весенний период характеризуется повышенной активностью биологических процессов, включая рост растений и водных организмов. В этот период площадь эвтрофикации может быть высокой из-за большого количества питательных веществ, поступающих в озеро из окружающей среды, таких как удобрения, органические отходы и дождевая вода.

Таким образом, температура не является единственным фактором, влияющим на развитие цианобактерий. Другие факторы, такие как доступность света, рН-уровень воды и наличие других органических веществ также играют важную роль.

Заключение

Предложенная методика для определения площади эвтрофикации внутренних водоемов с использованием данных сенсоров спутников серии *Landsat* позволяет определить площади эвтрофикации, а также оценить сезонную и межгодовую изменчивость областей, покрытых цианобактериями, в Чудско-Псковском озере за исследуемый период 2006 и 2023 гг.

Сравнение спектральных характеристик красного, синего и ближнего инфракрасного диапазонов сенсоров *Landsat* (*TM/ETM+/OLI*) показало, что несмотря на сходство используемых в данном исследовании сенсоров *Landsat*, они имеют определенные различия, которые необходимо минимизировать. Наибольшие различия наблюдаются в *Blue*-канале между сценами *ETM+* и *TM*, в то время как минимальные различия отмечены в *NIR*-канале (0,5–0,6 %). В целом наименее выраженные различия между сенсорами наблюдаются в *Blue* и *NIR*-каналах, несмотря на значительные различия в диапазонах для *NIR*-канала.

На основе используемой методики построены карты распределения областей, покрытых цветением цианобактерий по данным сенсоров спутников серии *Landsat*. Визуализация данных позволила выявить особенности распределения зон эвтрофикации в каждом из озер. Так, в Псковском озере наибольшее скопление сине-зеленых водорослей отмечается в его южной части, вблизи Талабских островов и вдоль береговой линии. Также скопление биомассы цианобактерий происходит в зонах конвергенции течений. В Чудском озере сине-зеленые водоросли образуют плотный тонкий слой, концентрирующийся в одном месте – в южной части водоема.

Верификация эвтрофированных областей, выделенных по спутниковым данным на основе наземных данных со станций лимнологических наблюдений для изучения Чудско-Псковского озера, показала среднюю (заметную) силу связи (коэффициент корреляции 0,50–0,70).

Динамика площади эвтрофикации Чудско-Псковского озера с мая по сентябрь за 2006 и 2023 годы, исследованная на основе результатов разработанной методики, показала, что максимальные значения площади эвтрофикации в Псковском озере наблюдались в 2006 и 2023 году в июне, в Чудском – в 2006 в сентябре, а в 2023 году – в июне. Интенсивное цветение в Псковском озере наблюдается с мая по июль, после чего площадь эвтрофикации постепенно снижается. В Чудском озере процесс развития сине-зеленых водорослей происходит позже, увеличение площади распространения цианобактерий наблюдается в августе – сентябре. Степень распространения цианобактерий за период исследования от общей площади водоема в 2023 году, по сравнению с 2006 годом, в среднем увеличилась в Чудском озере на 1,3 %, в Псковском озере – на 10,87 %.

Отмечено, что максимальная температура поверхности воды не всегда совпадает с максимальной площадью эвтрофикации озер. Таким образом, температура не является единственным фактором, влияющим на развитие цианобактерий. Другие факторы, такие как доступность света, рН-уровень воды и наличие органических веществ, также имеют значительное значение.



Список литературы

- Абросимов А.В., Дворкин Б.А. 2009. Возможности практического использования данных ДЗЗ из космоса для мониторинга водных объектов. *ГЕОМАТИКА*, 4: 54–63.
- Алескерова А.А., Кубряков А.А., Станичный С.В., Лишаев П.Н., Мизюк А.И. 2018. Цветение цианобактерий в Азовском море по данным сенсоров спутников серии Landsat. *Исследование Земли из космоса*, 6: 52–64. <https://doi.org/10.31857/S020596140003368-5>.
- Бабич О.О., Рада А.О., Куликова Ю.В., Сухих С.А. 2023. Изучение уровня эвтрофикации прибрежных вод Гданьского залива Балтийского моря с использованием данных дистанционного зондирования Земли. *Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки*, 1(217): 35–41.
- Вершинин А.О., Орлова Т. Ю. 2008. Токсичные и вредные водоросли в прибрежных водах России. *Океанология*, 48(4): 568–582.
- Даниличева О.А., Ермаков С.А. 2023. О проявлениях биогенных пленок на спутниковых мультиспектральных изображениях эвтрофированного водоема. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, 20(5): 273–284. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2023-20-5-273-284>
- Даниличева О.А., Ермаков С.А., Капустин И.А., Ермошкин А.В., Лазарева Т.Н., Лещев Г.В., Доброхотова Д.В., Сергиевская И.А. 2022а. Подспутниковые комплексные исследования зон цветения фитопланктона в Горьковском водохранилище. В кн.: *Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса (физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов)*. Материалы 20-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Москва, 14–18 ноября 2022. Москва, Институт космических исследований Российской академии наук, 156 с.
- Даниличева О.А., Ермаков С.А., Капустин И.А., Ермошкин А.В., Лазарева Т.Н., Лещев Г.В., Доброхотова Д.В., Сергиевская И.А. 2022б. Проявление зон интенсивного цветения фитопланктона в радиолокационных сигналах при зондировании внутренних водоемов. В кн.: *Проблемы экологии Волжского бассейна. Волга-2022. Труды 7-й всероссийской научной конференции*, Нижний Новгород, 27–29 ноября 2022. Нижний Новгород, Волжский государственный университет водного транспорта, 19 с.
- Елсаков В.В. 2021. Спектральные различия характеристик растительного покрова тундровых сообществ сенсоров Landsat. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, 18(4): 92–101. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-4-92-101>
- Карабашев Г.С., Евдошенко М.А. 2015. Спектральные признаки цветения цианобактерий в Балтийском море по данным сканера MODIS. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, 12(3): 158–170.
- Кутузов А.В. 2016. Оперативный спутниковый мониторинг скоплений планктонных водорослей и количественная оценка их плотности. *Географический вестник*, 3(38): 160–168. <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2016-3-160-168>
- Лаврова О.Ю., Соловьев Д.М., Строчков А.Я., Шендрик В.Д. 2014. Спутниковый мониторинг интенсивного цветения водорослей в Рыбинском водохранилище. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, 11(3): 54–72.
- Лаугасте Р., Ныгес Т., Ястремский В., Тынно И. 2012. Водоросли. Псковско-Чудское озеро. Тарту, *Eesti Loodusfoto*, 263–283.
- Румянцев В.А., Крюков Л.Н. 2013. «Цветение» воды – угроза экологической безопасности. *Известия русского географического общества*, 145(2): 1–9.
- Сухаревича В.И., Поляк Ю.М. 2020. Глобальное распространение цианобактерий: причины и последствия (обзор). *Биология внутренних вод*, 6: 562–572. <https://doi.org/10.31857/S0320965220060170>.
- Тимм Т., Раукас А., Хаберман Ю., Яни А. 2012. Псковско-Чудское озеро. Тарту. *Eesti Loodusfoto*, 495 с.
- Чурилова Т.Я., Кривенко О.В., Суслин В.В., Ефимова Т.В., Моисеева Н.А. 2016. Первичная продукция Черного моря: спектральный подход. *Морской биологический журнал*, 1(3): 50–53. <https://doi.org/10.21072/mbj.2016.01.3.08>.



- Чурилова Т.Я., Суслин В.В., Кривенко О.В., Ефимова Т.В., Моисеева Н.А. 2016. Спектральный подход к оценке скорости фотосинтеза фитопланктона в Черном море по спутниковой информации: методологические аспекты развития региональной модели. Журнал сибирского федерального университета. Серия: Биология, 9(4): 367–384. <https://doi.org/10.17516/1997-1389-2016-9-4-367-384>
- Ястремский В.В. 2010. Оценка интенсивности «цветения» воды синезелеными водорослями в Чудско-Псковском озере. В кн.: Развитие туризма в Балтийском регионе: предпосылки, современное состояние и перспективы. Материалы международной общественно-научной конференции, Псков, 18–19 ноября 2010. Псков, Логос Плюс: 181–183.
- Ястремский В.В. 2016. Структура и продуктивность фитопланктона Чудско-Псковского озера. СПб., Государственный научно-исследовательский институт озерного и речного рыбного хозяйства им. Л.С. Берга, 296 с.
- Ястремский В.В., Ястремская О.В. 2004. Роль синезеленых водорослей в экосистеме Псковско-Чудского озера. В кн.: Северо-Западная Россия: проблемы экологии и социально-экономического развития. Материалы региональной общественно-научной конференции с международным участием, Псков, 25–26 ноября 2004. Псков, Издательство Псковского областного центра народного творчества: 178–181.
- Behrenfeld M.J., Falkowski P.G. 1997. Photosynthetic Rates Derived from Satellite-Based Chlorophyll Concentration. *Limnology and Oceanography*, 42(1): 1–20. <https://doi.org/10.4319/lo.1997.42.1.0001>
- Bidigare R.R., Ondrusek M.E., Morrow J.H., Kiefer D.A. 1990. In Vivo Absorption Properties of Algal Pigments. *Proceedings of Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE)*, 1302: 290–302. <https://doi.org/10.1117/12.21451>
- Bidigare R.R., Prezelin B.B., Smith R.C. 1992. Bio-Optical Models and the Problems of Scaling. Primary Productivity and Biogeochemical Cycles in the Sea, 43: 175–212. https://doi.org/10.1007/978-1-4899-0762-2_11
- Blondeau-Patissier D., Gower J.F., Dekker A.G., Phinn S.R., Brando V.E. 2014. A Review of Ocean Color Remote Sensing Methods and Statistical Techniques for the Detection, Mapping and Analysis of Phytoplankton Blooms in Coastal and Open Oceans. *Progress in oceanography*, 123: 123–144. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2013.12.008>
- Demers S., Roy S., Gagnon R., Vignault C. 1991. Rapid Light-Induced Changes in Cell Fluorescence and in Xanthophyll-Cycle Pigments of *Alexandrium Excavatum* (Dinophyceae) and *Thalassiosira Pseudonana* (Bacillariophyceae): a Photoprotection Mechanism. *Marine Ecology Progress Series*, 76: 185–193.
- Engelmann T.W. 1902. Ueber Experimentelle Erzeugung Zwechmassiger Aenderungen der Färbung pflanzenlicher Chromophylle durch farbiges Licht. *Archiv für Anatomie und Physiologie, Physiologische abt.*: 333–335.
- Fu-Liu Xu, Shu Tao, R.W. Dawson, Beng-Gang Li. 2001. A GIS-Based Method of Lake Eutrophication Assessment. *Ecological Modelling*, 144(2–3): 231–244. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(01\)00374-X](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(01)00374-X)
- Gladyshev M.I., Gubelit Y.I. 2019. Green Tides: New Consequences of the Eutrophication of Natural Waters (Invited Review). *Contemporary Problems of Ecology*, 12(2): 109–125. <https://doi.org/10.1134/S1995425519020057>
- Hoepffner N., Sathyendranath S. 1992. Bio-Optical Characteristics of Coastal Waters: Absorption Spectra of Phytoplankton and Pigment Distribution in the Western North Atlantic. *Limnology and Oceanography*, 37(8): 1660–1679. <https://doi.org/10.4319/lo.1992.37.8.1660>
- Huang W., Huang J., Wang X., Wang F., Shi J. 2013. Comparability of Red/Near-Infrared Reflectance and NDVI Based on the Spectral Response Function between MODIS and 30 Other Satellite Sensors Using Rice Canopy Spectra. *Sensors (Basel)*, 13(12): 16023–16050. <https://doi.org/10.3390/s131216023>
- Jang S.Y., Xiong Q.X., Zhu J.Q. 2014. Evaluation of Lake Eutrophication Based on the HJ-1 Satellite Multispectral Data. *Applied Mechanics and Materials*, 519: 1184–1187. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.519-520.1184>



- Jeffrey S.W., Veski M. 1997. Introduction to Marine Phytoplankton and Their Pigment Signatures. In: *Phytoplankton Pigments in Oceanography: Guidelines to Modern Methods*. Paris, UNESCO Publ.: 37–84.
- Kahru M., Savchuk O.P., Elmgren R. 2007. Satellite Measurements of Cyanobacterial Bloom Frequency in the Baltic Sea: Interannual and Spatial Variability. *Marine Ecology Progress Series*, 343: 15–23. <https://doi.org/10.3354/meps06943>
- Kutser T., Metsamaa L., Strömbeck N., Vahtmäe E. 2006. Monitoring Cyanobacterial Blooms by Satellite Remote Sensing. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 67(1–2): 303–312. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2005.11.024>
- Lavrova O.Y., Mityagina M.I. 2016. Manifestation Specifics of Hydrodynamic Processes in Satellite Images of Intense Phytoplankton Bloom Areas. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 52(9): 974–987. <https://doi.org/10.1134/S0001433816090176>
- Lurling M., Eshetu F., Faassen E.J., Kosten S., Huszar V.M. 2013. Comparison of Cyanobacterial and Green Algal Growth Rates at Different Temperatures. *Freshwater Biology*, 58(3): 552–559. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2012.02866.x>
- Prezelin B.B., Tilzer M.M., Schofield O., Haese C. 1991. The Control of the Production Process of Phytoplankton by the Physical Structure of the Aquatic Environment with Special Reference to Its Optical Properties. *Aquatic Sciences*, 53(2/3): 136–186. <https://doi.org/10.1007/BF00877058>
- Rowan K.S. 1989. *Photosynthetic Pigments of Algae*. Cambridge, Cambridge University Press, 266 p.
- Siegel D.A., Behrenfeld M.J., Maritorena S., McClain C.R., Antoine D., Bailey S.W., Bontempi P.S., Boss E.S., Dierssen H.M., Doney S.C., Eplee Jr R.E., Evans R.H., Feldman G.C., Fields E., Franz B.A., Kuring N.A., Mengelt C., Nelson N.B., Patt F.S., Robinson W.D., Sarmiento J.L., Swan C.M., Werdell P.J., Westberry T.K., Wilding J.G., Yoder J.A. 2013. Regional to Global Assessments of Phytoplankton Dynamics from the SeaWiFS Mission. *Remote Sensing of Environment*, 135: 77–91. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.03.025>
- Suslin V., Churilova T. 2016. A Regional Algorithm for Separating Light Absorption by Chlorophyll-a and Colored Detrital Matter in the Black Sea Using 480-560 nm Bands from Ocean Color Scanners. *International Journal of Remote Sensing*, 37(18): 4380–4400. <https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1211350>
- Suzuki K., Kishino M., Sasaoka K., Saitoh S.-I., Saino T. 1998. Chlorophyll-Specific Absorption Coefficients and Pigments of Phytoplankton off Sanriku, Northwestern North Pacific. *Journal of Oceanography*, 54: 517–526. <https://doi.org/10.1007/BF02742453>
- Tammeorg O., Nürnberg G., Horppila J., Haldna M., Niemistö J. 2020. Redox-Related Release of Phosphorus from Sediments in Large And Shallow Lake Peipsi: Evidence from Sediment Studies and Long-Term Monitoring Data. *Journal of Great Lakes Research*, 46(6): 1595–1603. <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2020.08.023>
- Viso-Vázquez M., Acuña-Alonso C., Rodríguez J.L., Alvarez X. 2021. Remote Detection of Cyanobacterial Blooms and Chlorophyll-a Analysis in a Eutrophic Reservoir Using Sentinel-2. *Sustainability*, 13(15): 8570. <https://doi.org/10.3390/su13158570>
- Werdell P.J., McKinna L.I.W., Boss E., Ackleson S.G., Craig S.E., Gregg W.W., Lee Z., Maritorena S., Roesler C.S., Rousseaux C.S., Stramski D., Sullivan J.M., Twardowski M.S., Tzortziou M., Zhang X. 2018. An Overview of Approaches and Challenges for Retrieving Marine Inherent Optical Properties from Ocean Color Remote Sensing. *Progress in Oceanography*, 160: 186–212. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2018.01.001>
- Xu H. 2006. Modification of Normalised Difference Water Index (NDWI) to Enhance Open Water Features in Remotely Sensed Imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 27(14): 3025–3033. <https://doi.org/10.1080/01431160600589179>
- Zhang Y., Li M., Dong J., Yang H., Van Zwieten L., Lu H., Alshameri A., Zhan Z., Chen X., Jiang X., Xu W., Bao Y., Wang H.A. 2021. Critical Review of Methods for Analyzing Freshwater Eutrophication. *Water*, 13(2): 225. <https://doi.org/10.3390/w13020225>

References

- Abrosimov A.V., Dvorkin B.A. 2009. Practical Use of Remote Sensing Data for Monitoring Water Resources. *GEOMATIKA*, 4: 54–63 (in Russian).



- Aleskerova A.A., Kubrjakov A.A., Stanichnyj S.V., Lishaev P.N., Mizjuk A.I. 2018. Cyanobacteria Bloom in the Sea of Azov According to Landsat Data. *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*, 6: 52–64 (in Russian). <https://doi.org/10.31857/S020596140003368-5>
- Babich O.O., Rada A.O., Kulikova Yu.V., Sukhikh S.A. 2023. Study of Coastal Waters Eutrophication Level of Gdansk Bay (Baltic Sea) Using Earth Remote Sensing Data. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*, 1: 35–42 (in Russian).
- Vershinin A.O., Orlova T. Ju. 2008. Toxic and Harmful Algae in the Coastal Waters of Russia. *Oceanology*, 48(4): 524–537 (in Russian). <https://doi.org/10.1134/S0001437008040085>
- Danilicheva O.A., Ermakov S.A. 2023. On Biogenic Film Manifestations in Satellite Multispectral Images of Eutrophic Water Bodies. *Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*, 20(5): 273–284 (in Russian). <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2023-20-5-273-284>
- Danilicheva O.A., Ermakov S.A., Kapustin I.A., Ermoshkin A.V., Lazareva T.N., Leshhev G.V., Dobrohotova D.V., Sergievskaja I.A. 2022a. Podsputnikovye kompleksnye issledovanija zon cvetenija fitoplanktona v Gor'kovskom vodohranilishhe [Subsatellite Complex Studies of Phytoplankton Bloom Zones in the Gorky Reservoir]. In: [Modern Problems of Remote Sensing of the Earth from Space (Physical Foundations, Methods and Technologies for Monitoring the Environment, Potentially Hazardous Phenomena and Objects)]. Proceedings of the 20th International Conference "Modern Problems of Remote Sensing of the Earth from Space", Moscow, 14–18 November 2022. Moscow, Publ. Institut kosmicheskikh issledovaniy Rossiyskoy akademii nauk, 156 p.
- Danilicheva O.A., Ermakov S.A., Kapustin I.A., Ermoshkin A.V., Lazareva T.N., Leshhev G.V., Dobrohotova D.V., Sergievskaja I.A. 2022b. Projavlenie zon intensivnogo cvetenija fitoplanktona v radiolokacionnyh signalah pri zondirovanii vnutrennih vodoemov [Manifestation of Zones of Intense Phytoplankton Bloom in Radar Signals During Probing of Inland Water Bodies]. In: [Problems of Ecology of the Volga Basin. Volga-2022]. Proceedings of the 7th All-Russian scientific conference, Nizhny Novgorod, 27–29 November 2022. Nizhny Novgorod, Publ. Volzhskiy gosudarstvennyy universitet vodnogo transporta, 19.
- Elsakov V.V. 2021. Spectral Differences in Vegetation Cover Characteristics of Tundra Communities by Landsat Sensors. *Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*, 18(4): 92–101 (in Russian). <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-4-92-101>
- Karabashev G.S., Evdoshenko M.A. 2015. Spectral Features of Cyanobacterial Bloom in the Baltic Sea from MODIS Data. *Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*, 12(3): 158–170 (in Russian).
- Kutuzov A.V. 2016. Operational Satellite Monitoring of Plankton Algae Accumulation and Quantitative Estimation of Their Density. *Geographical Bulletin*, 3(38): 160–168 (in Russian). <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2016-3-160-168>
- Lavrova O.Yu., Soloviev D.M., Strohkov A.Ja., Shendrik V.D. 2014. Satellite Monitoring of Harmful Algae Bloom in Rybinsk Reservoir. *Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*, 11(3): 54–72 (in Russian).
- Laugaste R., Nyges T., Jastremskij V., Tynno I. 2012. Algae. Lake Pskov-Chudskoe. Tartu, Eesti Loodusfoto, 263–283 (in Russian).
- Rumyantsev V.A., Kryukov L.N. 2013. Water Bloom, a Threat to Environmental Safety. Proceedings of the Russian Geographical Society, 145(2): 1–9 (in Russian).
- Sukharevich V.I., Polyak Y.M. 2020. Global Occurrence of Cyanobacteria: Causes and Effects (Review). *Inland Water Biology*, 6: 562–572 (in Russian). <https://doi.org/10.31857/S0320965220060170>
- Timm T., Raukas A., Haberman Ju., Jaani A. 2012. Pskovsko-Chudskoe Ozero. Tartu, Eesti Loodusfoto, 495 p. (in Russian).
- Churilova T.Ya., Krivenko O.V., Suslin V.V., Efimova T.V., Moiseeva N.A. 2016. Primary Production of the Black Sea: Spectral Approach. *Marine Biological Journal*, 1(3): 50–53 (in Russian). <https://doi.org/10.21072/mbj.2016.01.3.08>
- Churilova T.Ya., Suslin V.V., Krivenko O.V., Efimova T.V., Moiseeva N.A. 2016. Spectral Approach to Assessment of Phytoplankton Photosynthesis Rate in the Black Sea Based on Satellite Information: Methodological Aspects of the Regional Model Development. *Journal of Siberian Federal University. Biology*, 9(4): 367–384 (in Russian). <https://doi.org/10.17516/1997-1389-2016-9-4-367-384>



- Yastremskiy V.V. 2010. Ocenka intensivnosti «cvetenija» vody sinezelenymi vodorosljami v Chudsko-Pskovskom ozere [Evaluation of the Intensity of Water Blooms by Blue-Green Algae in Lake Peipus]. In: Razvitiye turizma v Baltijskom regione: predposylki, sovremennoye sostoyaniye i perspektivy [Tourism Development in the Baltic Region: Prerequisites, Current Status and Prospects]. Proceedings of the international public-scientific conference, Pskov, 18–19 November 2010. Pskov, Publ. Logos Plus: 181–183.
- Yastremskiy V.V. 2016. Struktura i produktivnost' fitoplanktona Chudsko-Pskovskogo ozera [Structure and Productivity of Phytoplankton of Lake Peipus-Pskov]. Sankt-Petersburg, Publ. Gosudarstvennyy nauchno-issledovatel'skiy institut ozernogo i rechnogo rybnogo khozyaystva im. L.S. Berga, 296 p.
- Yastremskiy V.V., Yastremskaya O.V. 2004. Rol' sinezelenykh vodoroslej v jekosisteme Pskovsko-Chudskogo ozera [The Role of Blue-Green Algae in the Ecosystem of Lake Peipus]. In: Severo-Zapadnaya Rossiya: problemy ekologii i sotsialno-ekonomicheskogo razvitiya [North-West Russia: Problems of Ecology and Socio-Economic Development]. Proceedings of the regional public-scientific conference with international participation, Pskov, 25–26 November 2004. Pskov, Publ. Pskov Regional Center of Folk Art: 178–181 (in Russian).
- Behrenfeld M.J., Falkowski P.G. 1997. Photosynthetic Rates Derived from Satellite-Based Chlorophyll Concentration. *Limnology and Oceanography*, 42(1): 1–20. <https://doi.org/10.4319/lo.1997.42.1.0001>
- Bidigare R.R., Ondrusek M.E., Morrow J.H., Kiefer D.A. 1990. In Vivo Absorption Properties of Algal Pigments. *Proceedings of Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE)*, 1302: 290–302. <https://doi.org/10.1117/12.21451>
- Bidigare R.R., Prezelin B.B., Smith R.C. 1992. Bio-Optical Models and the Problems of Scaling. Primary Productivity and Biogeochemical Cycles in the Sea, 43: 175–212. https://doi.org/10.1007/978-1-4899-0762-2_11
- Blondeau-Patissier D., Gower J.F., Dekker A.G., Phinn S.R., Brando V.E. 2014. A Review of Ocean Color Remote Sensing Methods and Statistical Techniques for the Detection, Mapping and Analysis of Phytoplankton Blooms in Coastal and Open Oceans. *Progress in oceanography*, 123: 123–144. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2013.12.008>
- Demers S., Roy S., Gagnon R., Vignault C. 1991. Rapid Light-Induced Changes in Cell Fluorescence and in Xanthophyll-Cycle Pigments of *Alexandrium excavatum* (Dinophyceae) and *Thalassiosira pseudonana* (Bacillariophyceae): a Photoprotection Mechanism. *Marine Ecology Progress Series*, 76: 185–193.
- Engelmann T.W. 1902. Ueber Experimentelle Erzeugung Zwechmassiger Aenderungen der Färbung pflanzenlicher Chromophylle durch farbiges Licht. *Archiv für Anatomie und Physiologie, Physiologische abt.*: 333–335.
- Fu-Liu Xu, Shu Tao, R.W. Dawson, Beng-Gang Li. 2001. A GIS-Based Method of Lake Eutrophication Assessment. *Ecological Modelling*, 144(2–3): 231–244. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(01\)00374-X](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(01)00374-X)
- Gladyshev M.I., Gubelit Y.I. 2019. Green Tides: New Consequences of the Eutrophication of Natural Waters (Invited Review). *Contemporary Problems of Ecology*, 12(2): 109–125. <https://doi.org/10.1134/S1995425519020057>
- Hoepffner N., Sathyendranath S. 1992. Bio-Optical Characteristics of Coastal Waters: Absorption Spectra of Phytoplankton and Pigment Distribution in the Western North Atlantic. *Limnology and Oceanography*, 37 (8): 1660–1679. <https://doi.org/10.4319/lo.1992.37.8.1660>
- Huang W., Huang J., Wang X., Wang F., Shi J. 2013. Comparability of Red/Near-Infrared Reflectance and NDVI Based on the Spectral Response Function between MODIS and 30 Other Satellite Sensors Using Rice Canopy Spectra. *Sensors (Basel)*, 13(12): 16023–16050. <https://doi.org/10.3390/s131216023>
- Jang S.Y., Xiong Q.X., Zhu J.Q. 2014. Evaluation of Lake Eutrophication Based on the HJ-1 Satellite Multispectral Data. *Applied Mechanics and Materials*, 519: 1184–1187. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.519-520.1184>
- Jeffrey S.W., Veski M. 1997. Introduction to Marine Phytoplankton and Their Pigment Signatures. In: *Phytoplankton Pigments in Oceanography: Guidelines to Modern Methods*. Paris, UNESCO Publ.: 37–84.



- Kahru M., Savchuk O.P., Elmgren R. 2007. Satellite Measurements of Cyanobacterial Bloom Frequency in the Baltic Sea: Interannual and Spatial Variability. *Marine Ecology Progress Series*, 343: 15–23. <https://doi.org/10.3354/meps06943>
- Kutser T., Metsamaa L., Strömbeck N., Vahtmäe E. 2006. Monitoring Cyanobacterial Blooms by Satellite Remote Sensing. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 67(1–2): 303–312. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2005.11.024>
- Lavrova O.Y., Mityagina M.I. 2016. Manifestation Specifics of Hydrodynamic Processes in Satellite Images of Intense Phytoplankton Bloom Areas. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 52(9): 974–987. <https://doi.org/10.1134/S0001433816090176>
- Lurling M., Eshetu F., Faassen E.J., Kosten S., Huszar V.M. 2013. Comparison of Cyanobacterial and Green Algal Growth Rates at Different Temperatures. *Freshwater Biology*, 58(3): 552–559. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2012.02866.x>
- Prezelin B.B., Tilzer M.M., Schofield O., Haese C. 1991. The Control of the Production Process of Phytoplankton by the Physical Structure of the Aquatic Environment with Special Reference to Its Optical Properties. *Aquatic Sciences*, 53(2/3): 136–186. <https://doi.org/10.1007/BF00877058>
- Rowan K.S. 1989. *Photosynthetic Pigments of Algae*. Cambridge, Cambridge University Press, 266 p.
- Siegel D.A., Behrenfeld M.J., Maritorena S., McClain C.R., Antoine D., Bailey S.W., Bontempi P.S., Boss E.S., Dierssen H.M., Doney S.C., Eplee Jr R.E., Evans R.H., Feldman G.C., Fields E., Franz B.A., Kuring N.A., Mengelt C., Nelson N.B., Patt F.S., Robinson W.D., Sarmiento J.L., Swan C.M., Werdell P.J., Westberry T.K., Wilding J.G., Yoder J.A. 2013. Regional to Global Assessments of Phytoplankton Dynamics from the SeaWiFS Mission. *Remote Sensing of Environment*, 135: 77–91. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.03.025>
- Suslin V., Churilova T. 2016. A Regional Algorithm for Separating Light Absorption by Chlorophyll-a and Colored Detrital Matter in the Black Sea Using 480-560 nm Bands from Ocean Color Scanners. *International Journal of Remote Sensing*, 37(18): 4380–4400. <https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1211350>
- Suzuki K., Kishino M., Sasaoka K., Saitoh S.-I., Saino T. 1998. Chlorophyll-Specific Absorption Coefficients and Pigments of Phytoplankton off Sanriku, Northwestern North Pacific. *Journal of Oceanography*, 54: 517–526. <https://doi.org/10.1007/BF02742453>
- Tammeorg O., Nürnberg G., Horppila J., Haldna M., Niemistö J. 2020. Redox-Related Release of Phosphorus from Sediments in Large And Shallow Lake Peipsi: Evidence from Sediment Studies and Long-Term Monitoring Data. *Journal of Great Lakes Research*, 46(6): 1595–1603. <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2020.08.023>
- Viso-Vázquez M., Acuña-Alonso C., Rodríguez J.L., Alvarez X. 2021. Remote Detection of Cyanobacterial Blooms and Chlorophyll-a Analysis in a Eutrophic Reservoir Using Sentinel-2. *Sustainability*, 13(15): 8570. <https://doi.org/10.3390/su13158570>
- Werdell P.J., McKinna L.I.W., Boss E., Ackleson S.G., Craig S.E., Gregg W.W., Lee Z., Maritorena S., Roesler C.S., Rousseaux C.S., Stramski D., Sullivan J.M., Twardowski M.S., Tzortziou M., Zhang X. 2018. An Overview of Approaches and Challenges for Retrieving Marine Inherent Optical Properties from Ocean Color Remote Sensing. *Progress in Oceanography*, 160: 186–212. <https://doi.org/10.1016/j.pocan.2018.01.001>
- Xu H. 2006. Modification of Normalised Difference Water Index (NDWI) to Enhance Open Water Features in Remotely Sensed Imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 27(14): 3025–3033. <https://doi.org/10.1080/01431160600589179>
- Zhang Y., Li M., Dong J., Yang H., Van Zwieten L., Lu H., Alshameri A., Zhan Z., Chen X., Jiang X., Xu W., Bao Y., Wang H.A. 2021. Critical Review of Methods for Analyzing Freshwater Eutrophication. *Water*, 13(2): 225. <https://doi.org/10.3390/w13020225>

*Поступила в редакцию 21.03.2024;
поступила после рецензирования 08.08.2024;
принята к публикации 20.08.2024*

*Received March 21, 2024;
Revised August 08, 2024;
Accepted August 20, 2024*

Конфликт интересов: о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.
Conflict of interest: no potential conflict of interest related to this article was reported.



ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Евдокимов Сергей Игоревич, кандидат географических наук, доцент кафедры географии, Псковский государственный университет, г. Псков, Россия

Штефуряк Алина Викторовна, специалист лаборатории экологии и рыбохозяйственных водосемов, Псковский филиал ФГБНУ «ВНИРО» («ПсковНИРО»), г. Псков, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sergey I. Evdokimov, Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor of the Department of Geography, Pskov State University, Pskov, Russia

Alina V. Shtefuryak, Specialist of the Laboratory of Ecology and Fisheries Reservoirs, Pskov branch of FGBNU VNIRO (PskovNIRO), Pskov, Russia