

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2022-2-99-111>
УДК 556.531(476)

Поступила в редакцию 25.09.2022
Received 25.09.2022

ОЦЕНКА СТЕПЕНИ ЭВТРОФИРОВАНИЯ ВОДОТОКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПУТНИКОВОЙ ИНФОРМАЦИИ (НА ПРИМЕРЕ РЕКИ ПРИПЯТИ)

А. А. Волчек, Н. Н. Шешко, М. Ф. Кухаревич

Брестский государственный технический университет, Брест, Беларусь

Аннотация. В статье показана возможность использования спутниковой информации для оценки степени эвтрофирования р. Припять. Рассмотрен период с апреля 2018 г. по март 2022 г. Трофический статус р. Припять формируется под влиянием естественных факторов (алгоритмы группы А) и антропогенных воздействий (алгоритмы группы Б). Установлено, что во внутригодовой изменчивости концентрации хлорофилла а наблюдается снижение концентраций хлорофилла а за период с сентября/октября по декабрь/январь и их рост за период с февраля/марта по сентябрь/октябрь. Во внутригодовом разрезе трофический статус р. Припять по алгоритмам группы А в основном изменяется от α -эвтрофного до β -эвтрофного, а для группы Б он политрофный. В многолетнем плане изменчивости среднемесячных величин трофический статус р. Припять в основном по группе А эвтрофный, а по группе Б находится в диапазоне от β -эвтрофного до политрофного. Для окончательного вывода о степени эвтрофирования р. Припять потребуется более продолжительный период наблюдений. Исследование пространственной изменчивости концентрации хлорофилла а по течению р. Припять не выделило статистически значимых трендов, но в то же время установило влияние притоков.

Ключевые слова: вода; река; Припять; спутник; хлорофилл а; эвтрофикация; трофический статус; трофность; Sentinel-2.

Для цитирования. Волчек А. А., Шешко Н. Н., Кухаревич М. Ф. Оценка степени эвтрофирования водотоков с использованием спутниковой информации (на примере реки Припять) // Природопользование. – 2022. – № 2. – С. 99–111.

EVALUATION OF THE DEGREE OF WATER CURRENT EUTROPHICATION USING SATELLITE INFORMATION (BY EXAMPLE OF PRIPYAT RIVER)

A. A. Volchek, N. N. Sheshko, M. F. Kukharevich

Brest State Technical University, Brest, Belarus

Abstract. The article shows the possibility of using satellite information to assess the degree of eutrophication of the river. Pripyat. The period from April 2018 to March 2022 was considered. Pripyat is formed under the influence of natural factors (algorithms of group A) and anthropogenic influences (algorithms of group B). It has been established that in the intra-annual variability of chlorophyll-a concentration, there is a decrease in chlorophyll-a concentrations from September/October to December/January, and an increase in concentration from February/March to September/October. In the intra-annual section, the trophic status of the river. Pripyat according to the algorithms of group A mainly changes from α -eutrophic to β -eutrophic, and for group B it is polytrophic. In the long-term plan of variability of monthly averages, the trophic status of the river. Pripyat is mainly eutrophic in group A, and in group B it ranges from β -eutrophic to polytrophic. For the final conclusion about the degree of eutrophication of the river. Pripyat will need a longer observation period. Study of the spatial variability of the concentration of chlorophyll-a along the river. Pripyat did not identify statistically significant trends, but at the same time established the influence of inflows.

Keywords: water; river; Pripyat; satellite; chlorophyll-a; eutrophication; trophic status; trophicity; Sentinel-2.

For citation. Volchek A. A., Sheshko N. N., Kukharevich M. F. Evaluation of the degree of water current eutrophication using satellite information (by example of Pripyat river). *Nature Management*, 2022, no. 2, pp. 99–111.

Введение. Оценка эвтрофикации водотоков и водоемов является важной теоретической и практической задачей. В общем смысле эвтрофикация – это процесс, в ходе которого в водном объекте происходит накопление биогенных элементов, что сопровождается увеличением его биологической продуктивности. Этот естественный процесс в ряде случаев усиливается антропогенными факторами. Именно антропогенная эвтрофикация представляет в настоящее время большую угрозу, так как она значительно ускоряет процесс эвтрофикации водотоков и водоемов, слабо контролируется в связи с отсутствием или несовершенством очистных сооружений. Эвтрофикация приводит к материальным потерям в рыбном хозяйстве, рекреации, промышленности, водоснабжении и т. д.

В более конкретном смысле, согласно Л. И. Цветковой, эвтрофикация – «это процесс постепенного перехода водоема из дистрофного или олиготрофного состояния в эвтрофное, в основе которого лежит смещение биотического баланса экосистемы в сторону накопления первичного органического вещества вследствие преобладания скорости образования органических веществ (продукции) над скоростью их разложения (деструкции)» [1]. В данном определении под упомянутыми состояниями водного объекта понимается его трофический статус (трофность), который в некоторой степени выступает в качестве характеристики экологического состояния водного объекта [1].

Для оценки трофического статуса водного объекта и для целей прогнозирования его изменений проводится ряд исследований, включающих анализы состава воды в лаборатории на содержание кислорода, соединений фосфора, нитратов, органических веществ, хлорофилла и прочих параметров [2], что весьма время- и трудозатратно. В настоящее время находят применение методы оценки трофности, основанные на использовании данных дистанционного зондирования. Основным преимуществом методов дистанционного зондирования является возможность получения достаточно регулярных данных с приемлемой точностью, что обеспечивается высоким пространственным и временным разрешением.

В качестве параметров оценки трофического статуса водного объекта по данным дистанционного зондирования используется ряд характеристик, однако наибольший интерес и относительную простоту дает использование сведений о концентрации содержания хлорофилла а, так как данное вещество относительно хорошо детектируется со спутников.

Основной работой при использовании сведений о содержании хлорофилла а в воде водного объекта по данным дистанционного зондирования является выбор алгоритма взаимосвязи между концентрацией хлорофилла а и данными снимков, который включает подбор индекса соотношения спектров электромагнитного излучения и формы взаимосвязи величин. Несмотря на значительное количество индексов и алгоритмов индивидуальных для каждого водного объекта, важное значение представляет получение универсального алгоритма для широкого спектра водных объектов.

Цель работы – обосновать выбор алгоритмов по распознаванию содержания хлорофилла а в воде рек, полученных по данным дистанционного зондирования, для оценки степени эвтрофирования р. Припяти в среднем и нижнем ее течении.

Объектом исследования выбрана р. Припять на участке от г. Пинска до впадения ее в р. Днепр. Припять, средняя по европейским меркам река, протекает в пределах территории Украины и Беларуси. Ее длина составляет 761 км, из которых по Беларуси – 500 км. Площадь водосбора р. Припяти на территории Беларуси составляет 52,7 тыс. км². Долина реки слабо выражена и имеет ширину от 70–75 м до 5 км. Русло р. Припяти в ее верховье канализировано, а на остальном протяжении извилистое, поэтому встречаются меандры, старицы, заливы, песчаные острова. Ширина реки на участке от истока до р. Староход – 4–15 м, далее – 50–70, а в низовье – 100–250 м. Берега встречаются как пологие, так и крутые. Максимальный уровень воды на некоторых участках реки поднимается от 2 до 7 м и выпадает обычно на первую половину апреля. Замерзает река в первой половине декабря, а вскрытие ее происходит в конце марта [3, 4].

Материалы и методы исследования. В основу исследования положены данные дистанционного зондирования космической программы Sentinel за период с апреля 2018 г. по март 2022 г. Sentinel – это система спутников, реализованная в рамках программы Европейского Союза «Copernicus» по наблюдению за Землей [5] и ее глобальной динамикой (изучение облачности, радиационного баланса и биоклиматических параметров атмосферы, поверхности суши и океанов) [6]. В настоящее время программа насчитывает пять миссий, каждая из которых фокусируется на различных аспектах наблюдения за Землей [7]. Важными преимуществами системы Sentinel являются высокое разрешение, открытый доступ и широкий пространственно-временной охват. Стоит отметить, что главный аспект использования систем Sentinel – наличие спектрального канала в 704 нм, который детектирует хлорофилл.

Среди миссий системы Sentinel выбор остановлен на миссии Sentinel-2, которая включает два спутника, запущенных с целью мониторинга растительности, почвы и прибрежных районов. На обоих спутниках данной миссии установлен оптико-электронный мультиспектральный датчик (MSI) для съемки с разрешением от 10 до 60 м в видимом, ближнем инфракрасном (VNIR) и коротковолновом инфракрасном (SWIR) диапазонах спектра, представленных 13 спектральными каналами, что обеспечивает улавливание различий в состоянии растительности, включая временные изменения, а также минимизирует влияние на качество снимков атмосферы.

Загружаемые с серверов программы Sentinel-2 материалы со спутников А и В представлены архивами с набором данных, где основное место занимает растровое изображение различных спектральных каналов. Данные растры, в свою очередь, представлены двумя уровнями в зависимости от степени их обработки – 1С и 2А (излучение верхней и нижней части атмосферы соответственно). В этом исследовании в качестве уровня обработки снимков Sentinel-2 использован уровень снимков 2А. Данные продукты предоставляют собой изображения отражательной способности нижней части атмосферы (BOA), сгенерированные с использованием процессора Sen2Cor из продуктов уровня 1С, что не требует производить собственноручно атмосферную, геометрическую и прочие корректировки данных.

Большинство исследований содержания хлорофилла а в воде водных объектов по данным дистанционного зондирования включают в себя полевые работы, обработку данных зондирования и разработку алгоритма, который является главным результатом данных исследований. Разработанный для водного объекта алгоритм представляет собой формулу взаимосвязи между величиной излучения водной поверхности и измеренными концентрациями хлорофилла а. В рамках данной работы предпринята попытка определения концентраций хлорофилла а в воде р. Припяти существующими алгоритмами, верифицированными натурными исследованиями.

Методы исследования, использованные в работе, в основной массе реализованы в программной среде ArcGIS, обладающей широким функционалом обработки растрового изображения, модулем автоматизации ModelBuilding и растровой алгеброй.

Условно методы исследования можно разделить на такие этапы, как: подготовительный; предварительная обработка материалов; расчет концентраций хлорофилла а; постобработка результатов; анализ результатов.

Подготовительный этап. Первоначально на подготовительном этапе нами рассмотрено несколько источников данных дистанционного зондирования, из которых выбор остановлен на Sentinel по ранее отмеченным причинам, основными из которых являются наличие спектрального канала с длиной волны в 704 нм и высокое разрешение снимков.

Затем выполнена выгрузка материалов дистанционного зондирования необходимого уровня с серверов Sentinel-2 с последующей организацией базы данных.

На основании объекта исследований и имеющегося источника данных осуществлен выбор алгоритмов расчета концентрации хлорофилла а. В настоящее время выделяют несколько групп алгоритмов в зависимости от используемых спектральных каналов:

- Nir-Red-алгоритмы – используют красный и инфракрасный спектры;
- Red-Green-алгоритмы – используют красный и зеленый спектры;
- Red-blue-алгоритмы – используют красный и синий спектры;
- Blue-green-алгоритмы – используют синий и зеленый спектры;
- комбинированные алгоритмы – используют от трех разных диапазонов спектров.

Так как воды р. Припяти относятся к водам 2-го типа (мутные воды), нами выбраны алгоритмы типа Nir-Red, которые, по мнению некоторых авторов [8–11], для этого типа вод дают хорошие результаты (табл. 1).

Таблица 1. Алгоритмы расчета концентрации хлорофилла а по данным Sentinel-2

Table 1. Algorithms for calculating the concentration of chlorophyll-a according to Sentinel-2

Алгоритм – исходный индекс (в каналах Sentinel-2)	Формула связи, Chl	Водный объект
1. $NDCI = (R_{B05} - R_{B04}) / (R_{B05} + R_{B04})$	$14,039 + 86,115x + 194,325x^2$	Река Поти (Бразилия) [12]
2. $*MCI = R_{B05} - R_{B04} ((R_{B05} - R_{B04}) / (705 - 664)) / (865 - 664)$	$1726,50x + 18,29$	Озера Йезнас, Ширвис, Гостус и Швентас (Литва) [13]
3. $2BDA = R_{B05}^{-1} R_{B04}$	$41,80x - 15$	Озерный край Мекленбург – Бранденбург (Германия) [14]
4. $NDCI = (R_{B05} - R_{B04}) / (R_{B05} + R_{B04})$	$1,586 + 235,556x - 300,260x^2$	Горьковское водохранилище (Россия) [3]
5. $*YA10 = (R_{B04}^{-1} - R_{B05}^{-1}) / (R_{B06}^{-1} + R_{B05}^{-1})$	$43,20x - 10,2$	Озеро Эрмисту (Эстония) [15]
6. $*3B = R_{B05} - ((R_{B04} + R_{B06}) / 2)$	$2231x - 12,7$	Озера Нохипало Валгьярв, Пюхьярв, Рьуге Сууръярв, Вийтна, Пиккъярв, Эхиярв, Кариярве, Кеери, Кесму, Лохья, Вьртсъярв, Чудское озеро (Эстония) [16]
7. $3BDA = R_{B06} (R_{B04}^{-1} - R_{B05}^{-1})$	$260,1x - 27,9$	Чудское озеро (Эстония) [15]
8. $2BDA = R_{B05}^{-1} R_{B04}$	$25,985x^{3,117}$	Районы шлейфа реки Сагино и реки Кавкаулин озера Гурон (США) [17]
9. $*MCI = R_{B05} - 1,005 (R_{B04} + (R_{B06} - R_{B04}) / (705 - 665)) / (740 - 664)$	$2158x - 3,9$	Озеро Эри (США) [18]
10. $3BDA = R_{B06} (R_{B04}^{-1} - R_{B05}^{-1})$	$104,1x^2 + 221,1x + 2$	Водоохранилища Альбуфера, Беллус и Бениаррес (Испания) [19]

*Алгоритмы, требующие деления значений пикселей на 10 000.

П р и м е ч а н и я: R – используемые каналы спутников А и В программы Sentinel-2; x – значение индекса.

Серым и белым цветом в таблицах отмечены формулы и результаты вычислений, соответствующие алгоритмам группы А и алгоритмам группы Б соответственно.

Окончательный выбор конкретных алгоритмов обусловлен тем, что их разработали на основе данных Sentinel-2 и тем, что некоторые из них созданы для схожих климатических и природных зон, схожих водных объектов. Часть рассмотренных алгоритмов не адаптирована для исследуемого объекта, что может отразиться на результатах.

Предварительная обработка материалов. Начальная стадия данного этапа предусматривала визуальный анализ растров данных дистанционного зондирования с целью обнаружения потенциальных аномалий, обусловленных присутствием областей затенений, отмелей, льда и облаков. Данные аномалии могут приводить к появлению некорректных результатов, что будет рассмотрено ниже. После нахождения аномальных зон созданы маски, по которым данные зоны удалены из используемых растров.

Для вычисления концентрации хлорофилла *a* непосредственно в пределах русла р. Припяти определена область, соответствующая усредненному во времени руслу с помощью индекса NDWI [20]. После использования этого индекса осуществлена корректировка полигона русла для большего его усреднения, удаления артефактов преобразования растра из значений индекса NDWI в полигон и для дополнительного поиска аномальных зон и пикселей.

Имеются усредненный полигон русла р. Припяти и обработанные растры, которые были обрезаны по полигону русла, а затем объединены путем склеивания и осреднения в единый среднемесячный растр.

Несмотря на то что р. Припять исследована не на всей протяженности и что спутники А и В программы Sentinel-2 обладают весьма высокой регулярностью съемки, за один пролет снимки охватывают лишь часть рассматриваемого участка реки. По этой причине среднемесячный растр представляет собой объединенный по длине реки набор растров разных дат съемок. Также отчасти ограниченный охват приводит к тому, что регулярность съемки одно и того же участка реки ниже регулярности пролета спутников. Поэтому в месяц на один и тот же участок реки выпадает всего несколько полностью совпадающих снимков и небольшое количество смежных снимков. Помимо этого, на «регулярность съемки» влияют состояние атмосферы и водной поверхности, что приводит к получению еще меньшего числа пригодных снимков.

Эти особенности оказывают влияние на то, что среднемесячную концентрацию хлорофилла *a* по данным дистанционного зондирования рассчитывают по осредненным снимкам нескольких дней месяца. В некоторых месяцах снимки отдельных участков реки могут вообще отсутствовать.

Расчет концентраций хлорофилла *a*. Вычисления концентраций хлорофилла *a*, как и многие работы с мультиспектральным растром, осуществлены в среде ArcGIS, которая обладает алгеброй карт, что позволяет выполнять над растром математические операции.

Расчет концентраций осуществлен в соответствии с формулами, представленными в табл. 1. По результатам вычислений получены растры концентраций хлорофилла *a*, при анализе которых обнаружены пиксели с аномально большими или малыми значениями (рис. 1). Для исключения таких пикселей проведена постобработка.

Постобработка результатов. Изучив места расположения пикселей с аномальными значениями, можно сделать вывод, что данные пиксели соответствуют суше, отмели или иным источникам помех (рис. 1), а дополнительно проанализировав величины аномальных пикселей и их частоту, можно утверждать, что подтвержден случайный характер их появления (выбросы выборки) (рис. 2).

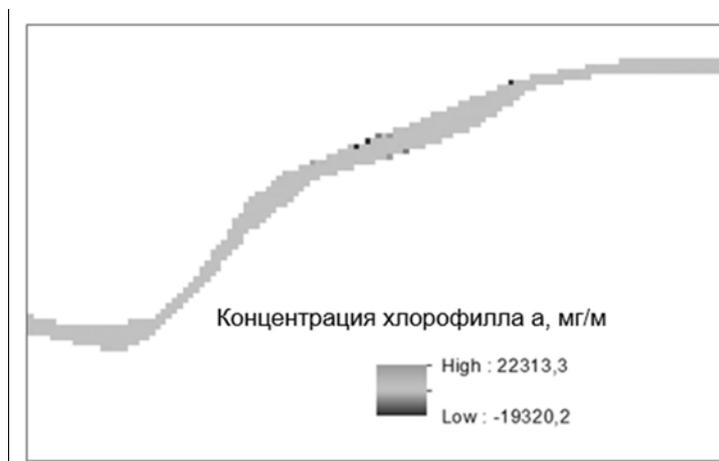


Рис. 1. Аномальные пиксели концентрации хлорофилла *a*

Fig. 1. Abnormal pixels of chlorophyll-*a* concentration

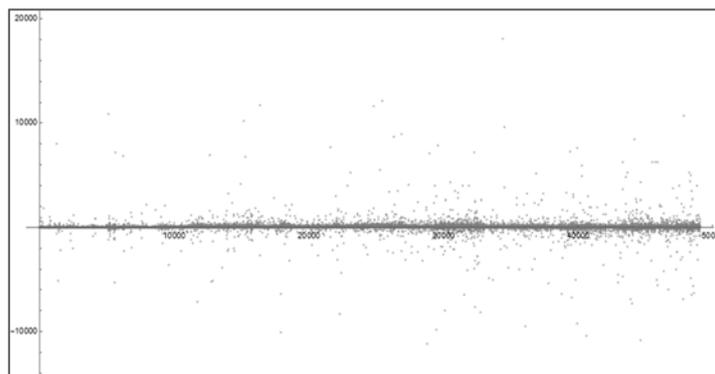


Рис. 2. Разброс значений раstra концентрации хлорофилла а

Fig. 2. The spread of values of the chlorophyll-a concentration raster

Для поиска выбросов выборки использовали метод 1.5 IQR, который предусматривает применение критериев на основе медианы, так как она в отличие от средней величины значительно менее подвержена воздействию выбросов выборки. При определении величин квартилей и величины межквартильного расстояния исходили из предположения, что выбросы выборки находились за пределами 1,5 межквартильного расстояния. Для установления границ значений аномальных пикселей использовали в соответствии с методом 1.5 IQR следующие условия:

$$\left[(x_{25} - 1,5(x_{75} - x_{25})), (x_{75} + 1,5(x_{75} - x_{25})) \right],$$

где x_{25} и x_{75} – первый и третий квартиль выборки, соответствующие 0,25 и 0,75 квантилям.

В исследовании [21] для значений пикселей устанавливали границы от 0 до 150 мг/м³. Нижний предел был обусловлен отсутствием отрицательных значений, а верхний предел соответствовал максимальной концентрации, установленной в ходе полевых исследований. В случае выхода за нижний предел значений пиксели исключали, тогда как при выходе за верхний предел приравнивали к максимальной величине. В нашем случае при выходе за пределы границ все значения исключали. Помимо установленных методом 1.5 IQR границ для растров с отрицательными пикселями, дополнительно применяли граничное значение, равное нулю для удаления отрицательных пикселей.

Анализ результатов. В ходе исследования дана оценка пространственно-временной изменчивости среднемесячных величин концентраций хлорофилла а для использованных нами алгоритмов, а также дана оценка трофического статуса реки как характеристики степени ее эвтрофирования.

Оценка временной изменчивости проведена путем построения временного ряда среднемесячных величин за период исследования с последующим визуальным анализом графиков. Внутригодовая изменчивость оценена по усредненным за несколько лет среднемесячным величинам концентраций хлорофилла а по месяцам.

Изучение пространственной изменчивости часто предусматривает исследования водного объекта по ширине и длине. Однако в нашем случае проведено исследование только по длине реки (по течению), так как ширина реки преимущественно незначительна и составляет в пиксельном эквиваленте зачастую всего несколько единиц пикселей. Для изменчивости концентрации хлорофилла а по течению реки использован инструмент программной среды ArcGIS, который на основании линейного объекта (направления русла реки) и раstra величин (раstra концентраций) создает таблицу с данными и график пространственной изменчивости величин раstra.

Помимо стандартного анализа пространственной изменчивости концентрации хлорофилла а по течению реки, исследованием предусмотрен предварительный анализ влияния на величину концентрации хлорофилла а в воде р. Припяти вод ее притоков. Предполагается, что за счет стока воды с притоков, в точках впадения их в р. Припять возможно изменение величин концентрации хлорофилла а в водах самой этой реки, из-за процессов разбавления или еще большего насыщения хлорофиллом а вод. Это следствие предполагается использовать для оценки трофического состояния с помощью данных дистанционного зондирования для рек и водотоков, которые нельзя исследовать системами дистанционного зондирования напрямую.

Для оценки трофического статуса р. Припяти в исследовании использована разработанная на основании ряда работ шкала трофности Китаева [22] (табл. 2), примененная для оценки трофического статуса водотоков в исследовании [23, 24].

Таблица 2. Шкала трофического статуса по содержанию хлорофилла а**Table 2. Trophic status scale based on chlorophyll-a content**

Тип водоема	Содержание хлорофилла, мг/дм ³	Тип водоема	Содержание хлорофилла, мг/дм ³
Ультра олиготрофный	<1,5	α-Евтрофный	12–24
Олиготрофный	1,5–3	β-Евтрофный	24–48
α-Мезотрофный	3–6	Политрофный	>48
β-Мезотрофный	6–12		

Результаты и их обсуждение. В ходе исследования концентраций хлорофилла а с помощью предложенных подходов установлено: несмотря на некоторую сопоставимость порядков значений, явно просматривается разделение существующих алгоритмов на две основные группы (табл. 3). Так, первая группа (группа А), представленная алгоритмами 1, 2, 3, 4, 6, 9, характеризуется более низкими значениями измеренных концентраций (см. табл. 3) по отношению ко второй (группа Б) с алгоритмами 5, 7, 8, 10. Диапазон изменчивости значений концентраций хлорофилла а для группы А расположился в интервале от 1,7 до 62,1 мг/дм³, а для группы Б – в интервале от 2,4 до 189,4 мг/дм³ (рис. 3). Важно отметить, что разделение алгоритмов на группы в основном соответствует используемым в алгоритмах индексам. Так, в основном одни и те же индексы попали в одинаковые группы алгоритмов.

Таблица 3. Среднемесячные концентрации хлорофилла а в воде р. Припяти**Table 3. Average monthly concentrations of chlorophyll-a in the water of the Pripyat River**

Дата	Концентрация хлорофилла а по алгоритмам, мг/дм ³									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
04.2018	–	22,7	32,0	14,5	25,3	18,9	52,4	37,7	7,7	24,8
05.2018	23,1	23,0	34,8	19,9	149,1	16,7	77,3	45,0	11,0	47,8
06.2018	32,6	31,6	42,6	31,3	54,4	29,4	100,1	70,9	20,5	71,5
07.2018	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
08.2018	33,2	34,2	43,1	32,0	55,9	31,6	101,2	72,5	22,7	72,7
09.2018	41,6	39,9	49,8	38,3	60,8	38,5	121,7	102,1	29,5	95,6
10.2018	52,2	38,5	58,4	43,3	39,5	39,4	120,5	152,0	27,2	94,1
11.2018	28,2	29,5	39,0	26,3	20,7	31,1	60,5	58,3	14,1	32,4
12.2018	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
2018	33	31	43	29	58	29	91	77	19	68
01.2019	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
02.2019	11,6	20,3	24,2	11,4	7,5	23,3	21,3	21,3	5,7	9,7
03.2019	18,1	26,2	30,4	13,6	14,1	29,5	39,5	34,2	8,3	15,6
04.2019	38,4	35,3	47,2	35,8	36,0	35,3	96,8	89,5	22,2	67,9
06.2019	23,8	22,1	35,4	20,8	103,7	15,9	81,4	46,7	10,1	52,1
07.2019	32,5	27,4	42,5	31,2	90,3	18,4	132,9	70,4	22,1	108,6
08.2019	38,9	35,6	47,6	36,6	79,5	32,1	127,6	91,6	25,8	102,2
09.2019	39,7	37,8	48,2	36,9	56,8	36,5	116,1	95,4	27,3	89,5
10.2019	56,2	45,1	62,1	44,3	55,9	45,2	150,3	189,4	35,7	128,3
11.2019	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
12.2019	24,3	31,8	35,9	24,1	19,7	34,6	55,4	48,1	16,7	30,8
2019	32	31	42	28	52	30	91	76	19	67
01.2020	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
02.2020	45,2	38,2	52,7	39,8	36,2	39,7	104,9	119,5	26,0	76,8
03.2020	55,8	49,0	61,4	44,7	51,3	50,1	143,5	170,6	39,3	120,9
04.2020	46,6	45,1	53,8	40,6	43,3	47,1	120,5	125,2	34,6	94,4
05.2020	43,6	41,1	51,4	39,0	72,0	39,0	135,1	112,3	32,1	111,4
06.2020	28,9	31,9	39,6	27,4	89,8	27,6	98,1	60,2	22,4	69,5
07.2020	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
08.2020	37,3	35,8	46,3	35,4	79,6	31,5	122,1	86,3	25,8	95,8
09.2020	43,6	36,6	51,3	39,6	98,3	32,3	145,8	109,1	27,6	123,6
10.2020	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
11.2020	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
12.2020	17,9	26,6	30,3	14,1	12,2	29,9	35,3	33,9	8,0	11,2

Окончание табл. 3
Ending table 3

Дата	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2020	40	38	48	35	60	37	113	102	27	88
01.2021	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
02.2021	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
03.2021	22,8	22,7	34,4	20,5	15,9	20,7	46,4	45,1	7,2	21,4
04.2021	18,9	23,0	31,3	12,8	25,1	19,7	49,0	35,8	7,8	21,3
05.2021	18,2	20,2	30,7	12,7	31,7	15,5	48,1	34,2	5,9	22,7
06.2021	26,9	25,4	38,0	25,1	124,0	18,7	101,8	54,5	21,5	73,4
07.2021	33,6	33,8	43,4	32,3	63,5	27,3	124,3	74,0	27,4	99,8
08.2021	30,7	32,7	41,0	29,5	41,1	31,9	84,9	64,8	20,6	55,8
09.2021	42,6	35,0	50,6	39,1	69,7	32,5	131,9	109,6	25,4	107,8
10.2021	36,3	32,6	45,5	34,4	32,4	33,0	90,0	83,5	19,5	61,2
11.2021	43,6	38,8	51,4	38,1	36,6	40,1	105,1	113,9	26,5	77,8
12.2021	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
2021	30	29	41	27,2	49	27	87	68	18	60
01.2022	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
02.2022	14,0	22,0	26,7	1,7	9,6	24,6	27,5	25,9	3,1	2,4
03.2022	14,2	20,4	26,9	2,0	13,4	18,3	28,6	26,2	3,5	2,8
Среднее	32	32	42	28	52	30	91	77	20	66

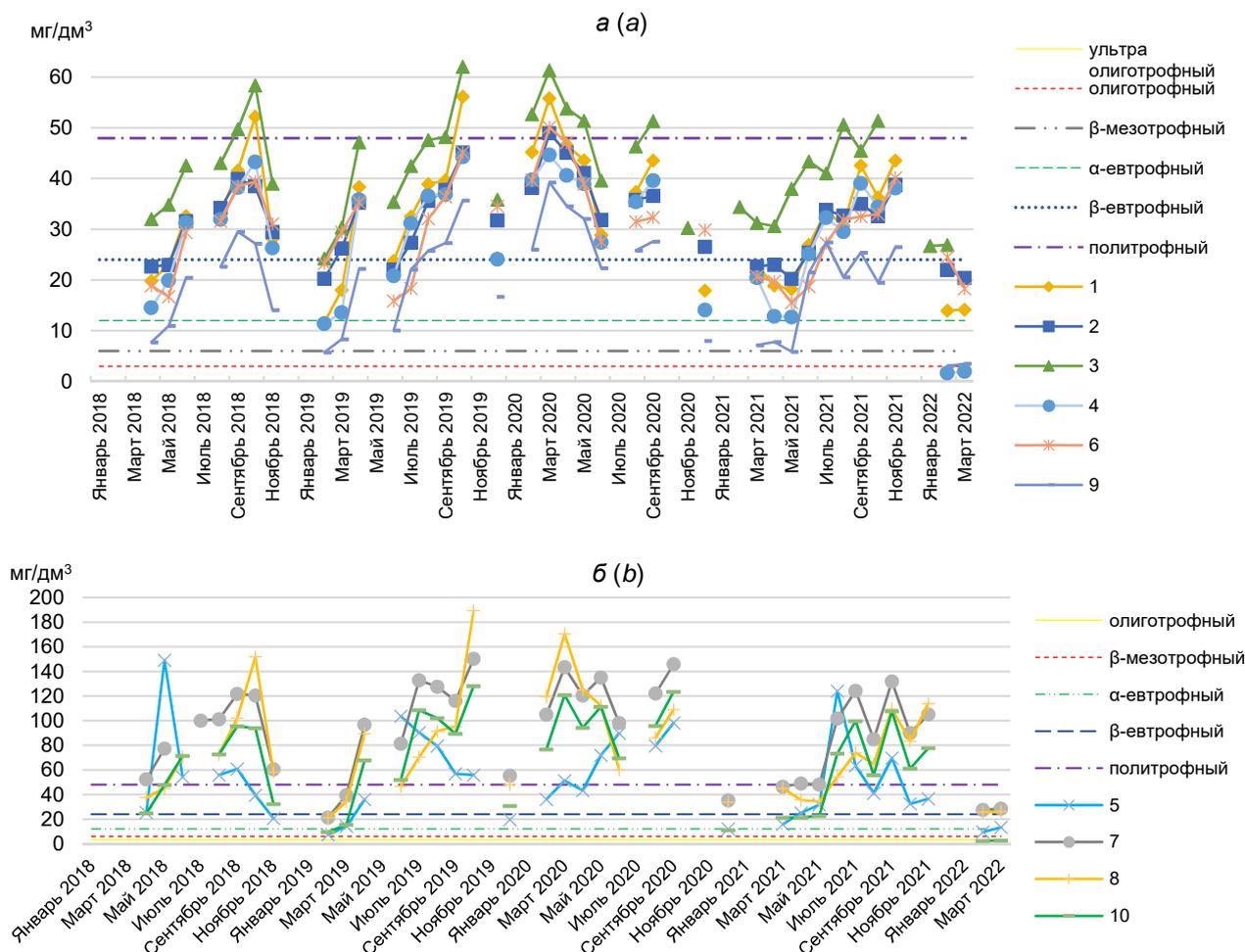


Рис. 3. Многолетняя изменчивость среднемесячных концентраций хлорофилла а: а – группа А; б – группа Б; 1–10 – алгоритмы из табл. 1

Fig. 3. Long-term variability of average monthly concentrations of chlorophyll-a: а – group A; б – group B; 1–10 – algorithms from table 1

Таким образом, имеет место схожесть характера сезонной изменчивости среднемесячных величин концентрации хлорофилла а в воде р. Припяти, несмотря на отличие уровней величин групп алгоритмов. Для обеих групп соблюдается тенденция к росту/спаду, а также совпадают точки экстремумов.

Внутригодовой характер изменчивости концентрации хлорофилла а имеет схожую динамику для двух групп алгоритмов. Так, для обеих групп наблюдалось снижение концентраций хлорофилла а за период с сентября/октября по декабрь/январь и рост концентрации за период с февраля/марта по сентябрь/октябрь (рис. 4).

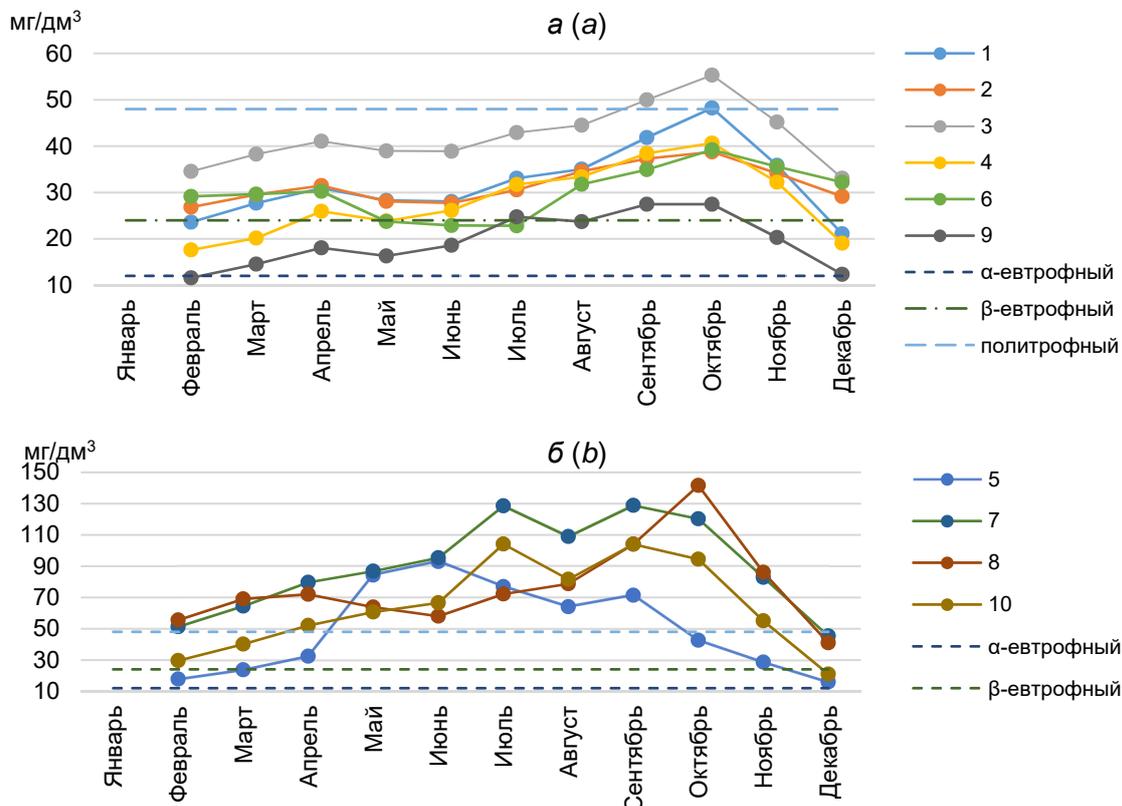


Рис. 4. Внутригодовая изменчивость концентрации хлорофилла а: а – группа А; б – группа Б; 1–10 – алгоритмы из табл. 1

Fig. 4. Intra-annual variability of chlorophyll-a concentration: a – group A; b – group B; 1–10 – algorithms from table 1

Однако некоторые отличия между группами алгоритмов наблюдаются в интервалах локальных максимумов и минимумов. Для большинства алгоритмов группы А и для некоторых алгоритмов из группы Б пики максимумов содержания хлорофилла а выпали на октябрь. В то же время для алгоритмов группы Б в основном отмечается выпадение пиков максимумов на сентябрь, а также наличие еще одного пика максимума в июле. Некоторой отличительной чертой для алгоритмов группы А является наличие локального минимума, выпадающего на май.

Изменчивость концентрации хлорофилла а по течению р. Припяти для алгоритмов группы А и Б, как и во временной изменчивости, весьма схожа, однако имеются значительные отличия для групп в диапазонах их величин и в размерах амплитуд значений (рис. 5). Для обеих групп алгоритмов в пространственной изменчивости хлорофилла а наблюдалось отсутствие сколько-нибудь значимой величины тренда.

Для оценки влияния притоков на концентрацию хлорофилла а в воде р. Припяти исследовался осредненный многолетний среднемесячный растр октября. Выбор данного месяца обусловлен тем, что в ходе анализа внутригодовой изменчивости концентрации хлорофилла а для большинства алгоритмов пик максимума концентрации хлорофилла а выпал именно на этот месяц (см. рис. 4). Предполагается, что именно в месяц с максимально возможными для р. Припяти и ее притоков концентрациями хлорофилла а будет наиболее явно просматриваться влияние притоков на пространственную изменчивость концентраций хлорофилла а в воде р. Припяти.

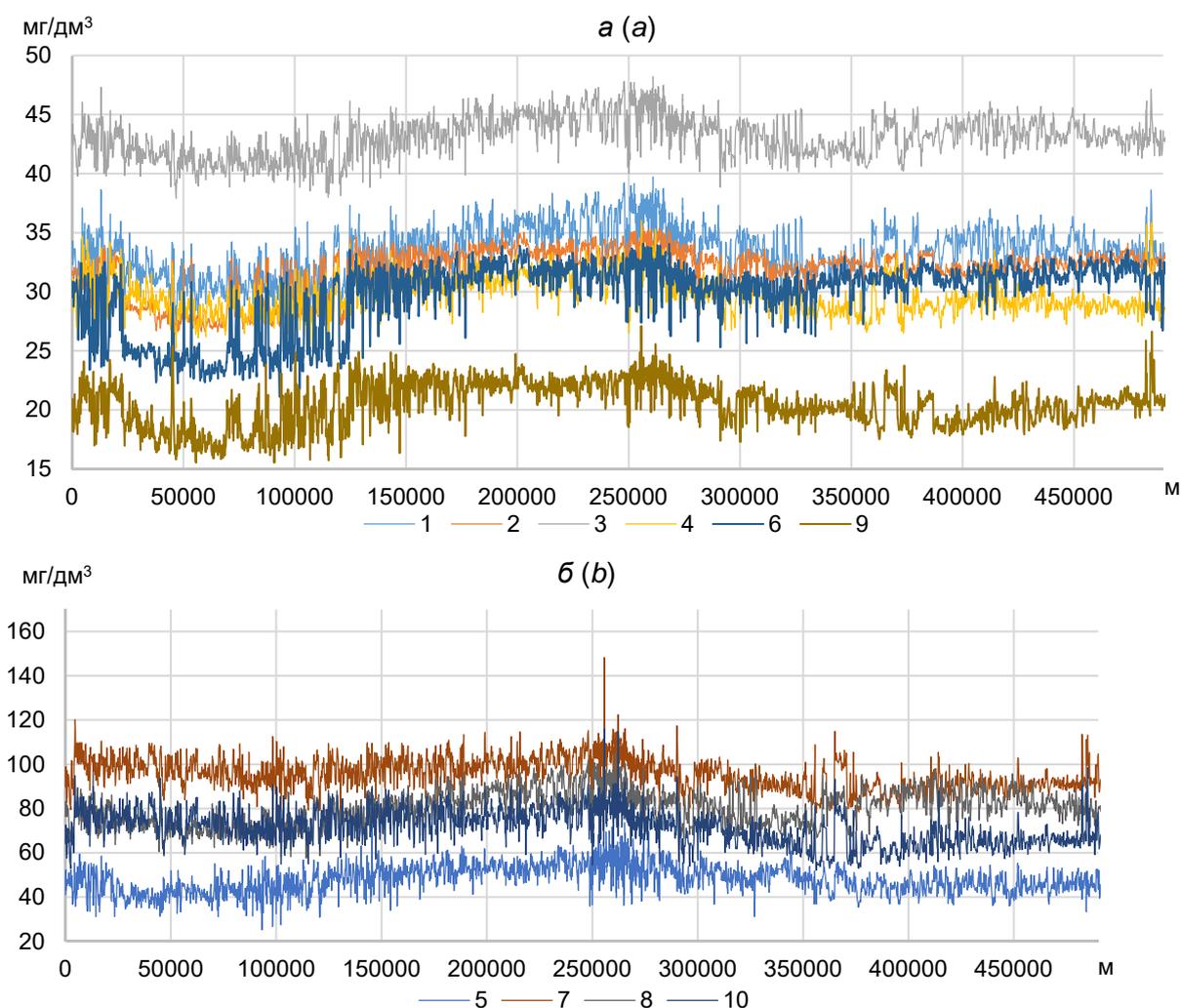


Рис. 5. Изменчивость концентрации хлорофилла а по длине Припяти:
а – группа А; б – группа Б; 1–10 – алгоритмы из табл. 1

Fig. 5. Variability of chlorophyll-a concentration along the length of the Pripyat:
a – group A; b – group B; 1–10 – algorithms from table 1

Так как пространственное разрешение используемых снимков составляет 20 м, а длина исследуемого участка реки более 400 км, полученные графики пространственной изменчивости дают очень плотную картину. Для получения менее плотной картины данные пространственной изменчивости хлорофилла а за октябрь обработаны методом окна скользящего среднего, что значительно улучшило визуализацию данных.

Исследование пространственной изменчивости средних многолетних концентраций хлорофилла а в октябре показало несколько совпадений точек впадения притоков в р. Припять с областями локальных максимумов или минимум концентраций хлорофилла а, за которыми следуют противоположные по направлению тенденции изменений концентраций (рис. 6). Вероятно, это и связано с тем, что притоки приносят воды с меньшим или с большим содержанием хлорофилла а, чем в р. Припяти, и таким образом снижают или увеличивают концентрацию хлорофилла в ней. Так как объективных сведений о состоянии вод, рассматриваемых притоков, а также из-за наличия на всем изучаемом протяжении р. Припяти значительного количества локальных максимумов и минимумов концентраций хлорофилла а, можно предполагать случайное попадание точек устьев в пики концентраций. В связи с этим рассмотрение более детальных исследований данного вопроса планируется нами в дальнейших исследованиях.

Во внутригодовом разрезе трофический статус р. Припяти для алгоритмов группы А в основном изменяется от α -евтрофного до β -евтрофного с некоторыми выходами в мезотрофную и политрофную области для отдельных алгоритмов (см. рис. 4, а). Для алгоритмов группы Б во внутригодовом разрезе

трофический статус р. Припяти в целом относится к политрофному при изменении от α -евтрофного до политрофного (см. рис. 4, б).

В многолетнем плане изменчивости среднемесячных величин трофический статус р. Припяти для двух групп алгоритмов представлен значениями статуса от олиготрофного до политрофного, при этом чаще всего трофический статус для группы А евтрофный (α и β), а для группы Б – β -евтрофно-политрофный.

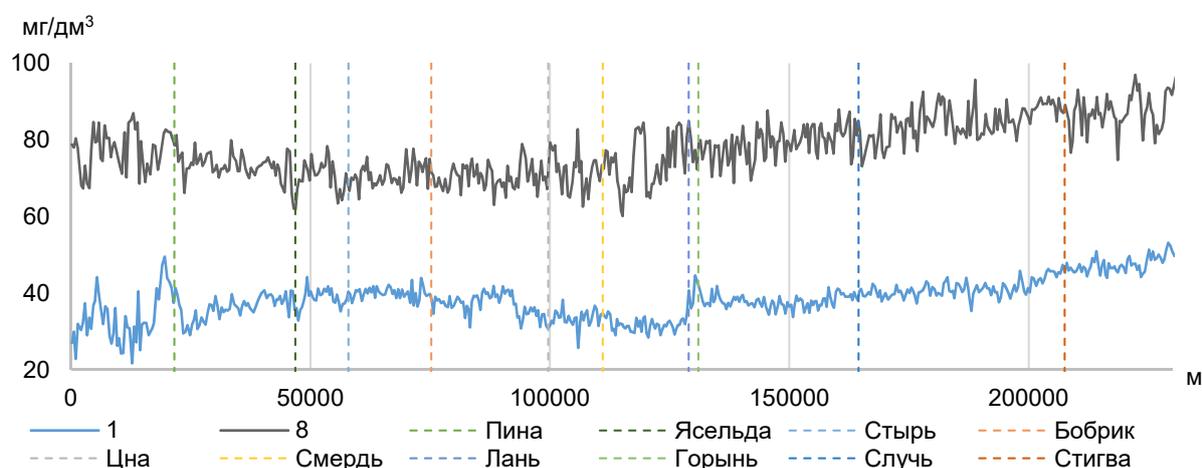


Рис. 6. Изменчивость многолетней среднемесячной концентрации хлорофилла а по длине р. Припяти за октябрь: 1, 8 – алгоритмы из табл. 1

Fig. 6. Variability of the long-term average monthly concentration of chlorophyll-a along the length of Pripyat in October; 1, 8 – algorithms from table 1

Исследования многолетней изменчивости среднегодовых величин концентрации хлорофилла а р. Припяти показали, что алгоритмы группы А по шкале трофического статуса (см. табл. 2) относят р. Припять преимущественно к β -евтрофному типу водного объекта (исключение алгоритм 9 – α -евтрофный), а алгоритмы группы Б – к политрофному типу (табл. 4).

Таблица 4. Трофический статус р. Припять по алгоритмам

Table 4. Trophic status of the Pripyat River by algorithms

Алгоритм	2018 г.		2019 г.		2020 г.		2021 г.		Средняя	
	Концентрация, мг/м ³	Трофический статус								
1	33	β -евтр.	31	β -евтр.	40	β -евтр.	30	β -евтр.	32	β -евтр.
2	31	β -евтр.	31	β -евтр.	38	β -евтр.	29	β -евтр.	32	β -евтр.
3	43	β -евтр.	42	β -евтр.	48	политроф.	41	β -евтр.	42	β -евтр.
4	29	β -евтр.	28	β -евтр.	35	β -евтр.	27	β -евтр.	28	β -евтр.
5	58	политроф.	52	политроф.	60	политроф.	49	политроф.	52	политроф.
6	29	β -евтр.	30	β -евтр.	37	β -евтр.	27	β -евтр.	30	β -евтр.
7	91	политроф.	91	политроф.	113	политроф.	87	политроф.	91	политроф.
8	77	политроф.	76	политроф.	102	политроф.	68	политроф.	77	политроф.
9	19	α -евтр.	19	α -евтр.	27	β -евтр.	18	α -евтр.	20	α -евтр.
10	68	политроф.	67	политроф.	88	политроф.	60	политроф.	66	политроф.

В многолетней изменчивости среднегодовых концентраций хлорофилла а для обеих групп алгоритмов выделяется 2020 г. Так, в сравнении с другими рассматриваемыми годами, в 2020 г. отмечены более высокие величины концентраций хлорофилла а, что, в свою очередь, привело для алгоритмов 3 и 9 к изменению трофического статуса р. Припяти. Данное изменение трофности р. Припяти можно объяснить усилением эвтрофикации в 2019–2020 гг., вызванного антропогенными воздействиями. При этом в многолетнем разрезе трофический статус р. Припяти остался неизменным.

Согласно алгоритмам группы А р. Припять можно отнести к евтрофному типу водного объекта, что характеризуется высоким содержанием органических веществ [25] с преобладанием естественной эвтрофикации. В то же время согласно алгоритмам группы Б р. Припять можно отнести к политрофному (гипертрофному) типу водного объекта, для которого характерно чрезмерное содержание биогенных веществ антропогенного происхождения. Сделать окончательный вывод о степени эвтрофикации р. Припяти антропогенного и естественного происхождения, о направлении и скорости изменения трофности, используя столь короткий период наблюдений, очень затруднительно. Для этого потребуется более продолжительный период наблюдений.

Выводы

Оценка степени эвтрофирования Средней и Нижней Припяти за период с апреля 2018 г. по март 2022 г. путем анализа трофического статуса показала следующее.

1. Во внутригодовой изменчивости концентрации хлорофилла а наблюдаются снижение его концентраций за период с сентября/октября по декабрь/январь и рост концентраций за период с февраля/марта по сентябрь/октябрь.

2. Для большинства алгоритмов группы А и некоторых алгоритмов группы Б пики максимумов содержания хлорофилла а выпали на октябрь, тогда как для алгоритмов группы Б – в основном на сентябрь.

3. В колебаниях концентрации хлорофилла а по течению реки статистически значимых трендов выделить не удалось.

4. На пространственную изменчивость концентраций хлорофилла а оказывают влияние притоки.

5. Во внутригодовом разрезе трофический статус р. Припяти по алгоритмам группы А в основном изменяется от α -евтрофного до β -евтрофного, а для группы Б он политрофный.

6. В многолетнем плане изменчивости среднемесячных величин трофический статус р. Припяти в основном по группе А евтрофный, а по группе Б изменяется от β -евтрофного до политрофного.

7. В многолетнем плане изменчивости среднегодовых величин по алгоритмам группы А р. Припять относится преимущественно к β -евтрофному типу водного объекта (исключение алгоритм 9 – α -евтрофный), а для группы Б – к политрофному типу.

8. В многолетнем ходе изменчивости среднегодовых величин выделяется 2020 г. с более высокими величинами концентраций хлорофилла а и отличным для алгоритмов 3 и 9 трофическим статусом р. Припяти.

Список использованных источников

1. Неверова-Дзюпак, Е. Оценка трофического состояния поверхностных вод / Е. Неверова-Дзюпак, Л. И. Цветкова. – СПб. : СПбГАСУ, 2020. – 176 с.
2. Суховило, Н. Ю. Пространственные закономерности устойчивости озер Беларуси к эвтрофированию / Н. Ю. Суховило, А. А. Новик // Природопользование. – 2019. – № 1. – С. 51–65.
3. Природа Беларуси : энциклопедия : в 3 т. / редкол.: Т. В. Белова [и др.]. – Минск : Беларус. энцыкл. імя П. Броўкі, 2009–2010. – Т. 2. – 2010. – 504 с.
4. Блакітная кніга Беларусі : энцыклапедыя / рэдкал.: Н. А. Дзісько [і інш.]. – Мінск : БелЭн, 1994. – 415 с.
5. About Copernicus [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.copernicus.eu/en/about-copernicus>. – Date of access: 20.06.2022.
6. Климатические исследования Института природопользования НАН Беларуси / В. Ф. Логинов [и др.] // Природопользование. – 2018. – № 1. – С. 67–86.
7. Sentinel Overview [Electronic resource]. – Mode of access: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions>. – Date of access: 01.06.2022.
8. Choe, E. Monitoring and modelling of chlorophyll-a concentrations in rivers using a high-resolution satellite image: a case study in the Nakdong river, Korea / E. Choe, J. W. Lee, S. U. Cheon // International Journal of Remote Sensing. – 2015. – Vol. 36, № 6. – P. 1645–1660.
9. Estimation of chlorophyll-a concentration in estuarine waters: Case study of the Pearl River estuary, South China Sea / Y. Zhang [et al.] // Environ. Res. Lett. – 2011. – Vol. 6, № 2. – P. 1–9.
10. Estimation of chlorophyll-a concentration in case II waters using MODIS and MERIS data-successes and challenges / W. J. Moses [et al.] // Environ. Res. Lett. – 2009. – Vol. 4, №16. – P. 1–8.
11. Regional Models for High-Resolution Retrieval of Chlorophyll a and TSM Concentrations in the Gorky Reservoir by Sentinel-2 Imagery / A. A. Molkov [et al.] // Remote Sens. – 2019. – Vol. 11, № 10. – P. 1–29.
12. Retrieval and mapping of chlorophyll-a concentration from sentinel-2 images in an urban river in the semiarid region of Brazil / A. R. A. Pereira [et al.] // Rev. Ambiente Agua. – 2020. – Vol. 15, № 2. – P. 1–13.
13. Grendaitė, D. Chlorophyll-a concentration retrieval in eutrophic lakes in Lithuania from Sentinel-2 data / D. Grendaitė, E. Stonevičius // Geol. Geogr. – 2018. – Vol. 4, № 1. – P. 15–28.

14. The Use of Sentinel-2 for Chlorophyll-a Spatial Dynamics Assessment: A Comparative Study on Different Lakes in Northern Germany / I. Ogashawara [et al.] // *Remote Sens.* – 2021. – Vol. 13, № 8. – P. 1–26.
15. Anspér, A. Retrieval of Chlorophyll a from Sentinel-2 MSI Data for the European Union Water Framework Directive Reporting Purposes / A. Anspér, K. Alikas // *Remote Sens.* – 2019. – Vol. 11, № 1. – P. 1–26.
16. First Experiences in Mapping Lake Water Quality Parameters with Sentinel-2 MSI Imagery / K. Toming [et al.] // *Remote Sens.* – 2016. – Vol. 8, № 8. – P. 1–14.
17. Remote estimation of colored dissolved organic matter and chlorophyll-a in Lake Huron using Sentinel-2 measurements / J. Chen [et al.] // *Journal of Applied Remote Sensing.* – 2017. – Vol. 11, № 3. – P. 1–15.
18. Estimation of Phytoplankton Chlorophyll-a Concentrations in the Western Basin of Lake Erie Using Sentinel-2 and Sentinel-3 Data / S. Pirasteh [et al.] // *Canadian Journal of Remote Sensing.* – 2020. – Vol. 46, № 5. – P. 585–602.
19. Calibration and validation of algorithms for the estimation of the chlorophyll-a concentration and Secchi depth in inland waters with Sentinel-2 / M. Pereira-Sandoval [et al.] // *Limnetica.* – 2019. – Vol. 38, № 1. – P. 471–487.
20. Морозова, В. А. Расчет индексов для выявления и анализа характеристик водных объектов с помощью данных дистанционного зондирования / В. А. Морозова // *Современные проблемы территориального развития.* – 2019. – № 2. – С. 1–12.
21. Пространственное распределение и сезонная динамика концентрации хлорофилла “а” в Азовском море по данным спутниковых снимков спектрометра MERIS / В. В. Сапрыгин [и др.] // *Океанология.* – 2018. – Т. 58, № 5. – С. 751–762.
22. Китаев, С. П. Основы лимнологии для гидробиологов и ихтиологов / С. П. Китаев. – Петрозаводск : Наука, 2007. – 395 с.
23. Логинов, В. В. Оценка трофического статуса и гидрохимического состава малых рек Нижегородской области и сопредельных территорий / В. В. Логинов, Т. В. Кривдина, О. А. Морева // *Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии, Нижегородский филиал.* – 2021. – № 26. – С. 3–25.
24. Оценка трофности устьевоего участка Оки на основании современных абиотических и биотических показателей водных масс / В. В. Логинов [и др.] // *Norwegian Journal of development of the International Science.* – 2021. – № 54. – С. 13–27.
25. Энциклапедыя прыроды Беларусі : у 5 т. / рэдкал.: І. П. Шамякін [і інш.]. – Мінск : Беларус. Сав. энцыклапедыя, 1983–1986. – Т. 5. – 1986. – 583 с.

References

1. Neverova-Dziopak E., Cvetkova L. I. *Ocenka troficheskogo sostojanija poverhnostnyh vod* [Assessment of the trophic state of surface waters]. SPb., 2020, 176 p. (in Russian)
2. Suhovilo N. Ju., Novik A. A. *Prostranstvennye zakonomernosti ustojchivosti ozer Belarusi k jevtrofirovaniju* [Spatial patterns of resistance of lakes of Belarus to eutrophication], *Prirodopol'zovanie = Nature Management*, 2019, no. 1, pp. 51–65. (in Russian)
3. Belova T. V. [et al.] (eds.). *Priroda Belarusi: jencyklopedija: v 3 t.* [Nature of Belarus: an encyclopedia: in 3 vol.]. Minsk, 2009–2010, vol. 2, 2010, 504 p. (in Russian)
4. Dzis'ko N. A. [et al.] (eds.). *Blakitnaja kniga Belarusi: Jencyklopedyja* [The Blue Book of Belarus: Encyclopedia]. Minsk, 1994, 415 p. (in Belarussian)
5. About Copernicus. Available at: <https://www.copernicus.eu/en/about-copernicus> (accessed 20 June 2022).
6. Loginov V. F., Lysenko S. A., Danilovich I. S., Kamyshenko G. A., Koljada V. V., Mel'nik V. I., Mikuckij V. S., Tabal'chuk T.G., Hitrikov M. A., Chernyshev V. D. *Klimaticheskie issledovanija Instituta prirodopol'zovanija NAN Belarusi* [Climatic research of the Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus]. *Prirodopol'zovanie = Nature Management*, 2018, no. 1, pp. 67–86. (in Russian)
7. Sentinel Overview. Available at: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions> (accessed 01 June 2022).
8. Choe E., Lee J. W., Cheon S. U. Monitoring and modelling of chlorophyll-a concentrations in rivers using a high-resolution satellite image: a case study in the Nakdong river, Korea. *International Journal of Remote Sensing*, 2015, vol. 36, no. 6, pp. 1645–1660.
9. Zhang Y., Lin H., Chen C., Chen L., Zhang L. B., Gitelson A. A. Estimation of chlorophyll-a concentration in estuarine waters: Case study of the Pearl River estuary, South China Sea. *Environ. Res. Lett.*, 2011, vol. 6, no. 2, pp. 1–9.
10. Moses W. J., Gitelson A. A., Berdnikov S., Povazhnyy V. Estimation of chlorophyll-a concentration in case II waters using MODIS and MERIS data-successes and challenges. *Environ. Res. Lett.*, 2009, vol. 4, no.16, pp. 1–8.
11. Molkov A. A., Fedorov S. V., Pelevin V. V., Korchemkina E. N. Regional Models for High-Resolution Retrieval of Chlorophyll a and TSM Concentrations in the Gorky Reservoir by Sentinel-2 Imagery. *Remote Sens*, 2019, vol. 11, no. 10, pp. 1–29.
12. Pereira A. R. A., Lopes J. B., de Espindola G. M., da Silva C. E. Retrieval and mapping of chlorophyll-a concentration from sentinel-2 images in an urban river in the semiarid region of Brazil. *Rev. Ambiente Agua*, 2020, vol. 15, no. 2, pp. 1–13.
13. Grendaitė D., Stonevičius E. Chlorophyll-a concentration retrieval in eutrophic lakes in Lithuania from Sentinel-2 data. *Geol. Geogr.*, 2018, vol. 4, no. 1, pp. 15–28.

14. Ogashawara I., Kiel C., Jechow A., Kohnert K., Ruhtz T., Grossart H. P., Hölker F., Nejtgaard J. C., Berger S. A., Wollrab S. The Use of Sentinel-2 for Chlorophyll-a Spatial Dynamics Assessment: A Comparative Study on Different Lakes in Northern Germany. *Remote Sens*, 2021, vol. 13, no. 8, pp. 1–26.
15. Ansper A., Alikas K. Retrieval of Chlorophyll a from Sentinel-2 MSI Data for the European Union Water Framework Directive Reporting Purposes. *Remote Sens*, 2019, vol. 11, no. 1, pp. 1–26.
16. Toming K., Kutser T., Laas A., Sepp M., Paavel B., Nõges T. First Experiences in Mapping Lake Water Quality Parameters with Sentinel-2 MSI Imagery. *Remote Sens*, 2016, vol. 8, no. 8, pp. 1–14.
17. Chen J., Zhu W., Tian Y. Q., Yu Q., Zheng Y., Huang L. Remote estimation of colored dissolved organic matter and chlorophyll-a in Lake Huron using Sentinel-2 measurements. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2017, vol. 11, no. 3, pp. 1–15.
18. Pirasteh S., Mollaee S., Fathollahi S. N., Li J. Estimation of Phytoplankton Chlorophyll-a Concentrations in the Western Basin of Lake Erie Using Sentinel-2 and Sentinel-3 Data. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2020, vol. 46, no. 5, pp. 585–602.
19. Pereira-Sandoval, M., Urrego, P., Ruíz-Verdú A., Delegido J., Soria J., Perpinyà J., Vicente E., Moreno J. Calibration and validation of algorithms for the estimation of the chlorophyll-a concentration and Secchi depth in inland waters with Sentinel-2. *Limnetica*, 2019, vol. 38, no. 1, pp. 471–487.
20. Morozova V. A. Raschet indeksov dlja vyjavlenija i analiza harakteristik vodnyh ob#ektov s pomoshh'ju dannyh distancionnogo zondirovanija [Calculation of indices for identification and analysis of characteristics of water bodies using remote sensing data]. *Sovremennye problemy territorial'nogo razvitija = Modern problems of territorial development*, 2019, vol. 2, pp. 1–12. (in Russian)
21. Saprygin V. V., Berdnikov S. V., Kulygin V. V., Dashkevich L. V., Mesteckij L. M. *Prostranstvennoe raspredelenie i sezonnaja dinamika koncentracii hlorofilla "a" v Azovskom more po dannyh sputnikovyh snimkov spektrometra MERIS* [Spatial distribution and seasonal dynamics of chlorophyll "a" concentration in the Sea of Azov according to satellite images of the MERIS spectrometer]. *Okeanologija = Oceanology*, 2018, vol. 58, no. 5, pp. 751–762. (in Russian)
22. Kitaev S. P. *Osnovy limnologii dlja gidrobiologov i ihtologov* [Basics of limnology for hydrobiologists and ichthyologists]. Petrozavodsk, 2007, 395 p. (in Russian)
23. Loginov V. V., Krivdina T. V., Moreva O. A. *Ocenka troficheskogo statusa i gidrohimicheskogo sostava malyh rek Nizhegorodskoj oblasti i sopredel'nyh territorij* [Assessment of trophic status and hydrochemical composition of small rivers of the Nizhny Novgorod region and adjacent territories]. *Vserossijskij nauchno-issledovatel'skij institut rybnogo hozjajstva i okeanografii, Nizhegorodskij filial*, 2021, no. 26, pp. 3–25. (in Russian)
24. Loginov V. V., Minina L. M., Krivdina T. V., Vodeneeva E. L., Lavrova T. V., Mushkova D. V. *Ocenka trofnosti us'evogo uchastka Oki na osnovanii sovremennyh abioticheskikh i bioticheskikh pokazatelej vodnyh mass* [Evaluation of the trophicity of the mouth section of the Oka on the basis of modern abiotic and biotic indicators of water masses]. *Norwegian Journal of development of the International Science*, 2021, no. 54, pp. 13–27. (in Russian)
25. Shamjakin I. P. [et al.] (eds.). *Jencyklapedyja pryrody Belarusi: u 5 t.* [Encyclopedia of nature of Belarus: in 5 vol.]. Minsk, Belarus, 1983–1986, vol. 5, 1986, 583 p. (in Belarussian)

Информация об авторах

Волчек Александр Александрович – доктор географических наук (Российской Федерации и Республики Беларусь), профессор, декан факультета инженерных систем и экологии, Брестский государственный технический университет (ул. Московская, 267, 224017, г. Брест, Беларусь). E-mail: Volchak@tut.by

Шешко Николай Николаевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры природообустройства, Брестский государственный технический университет (ул. Московская, 267, 224017, г. Брест, Беларусь). E-mail: optimum@tut.by

Кухаревич Михаил Федорович – магистр технических наук, аспирант кафедры природообустройства, Брестский государственный технический университет (ул. Московская, 267, 224017, г. Брест, Беларусь). E-mail: kukharevichmikhail@gmail.com

Information about the authors

Aliaksandr A. Volchak – D. Sc. (Geographical), Professor, Dean of the Faculty of Engineering Systems and Ecology, Brest State Technical University (Moskovskaya Str., 267, 224017, Brest, Belarus). E-mail: Volchak@tut.by

Nikolay N. Sheshko – Ph. D. (Technical), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Environmental Management, Brest State Technical University (Moskovskaya Str., 267, 224017, Brest, Belarus). E-mail: optimum@tut.by

Mikhail F. Kukharevich – Master of Technical Sciences, postgraduate student of the Department of Environmental Management, Brest State Technical University (Moskovskaya Str., 267, 224017, Brest, Belarus). E-mail: kukharevichmikhail@gmail.com