

Динамика концентрации хлорофилла *a* в поверхностных водах Онежского озера по спутниковым наблюдениям за 1998–2022 гг.

В. Н. Баклагин, Ю. С. Новикова

Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН
Петрозаводск, 185030, Россия
E-mail: slava.baklagin@mail.ru

Работа посвящена оценке многолетней изменчивости концентрации хлорофилла *a* в поверхностных водах Онежского озера на основе спутниковых данных за 1998–2022 гг. Используются массивы спутниковых данных, представленные продуктом GlobColour службы мониторинга морской среды Copernicus и продуктом Ocean Color Climate Change Initiative Европейского космического агентства. Рассчитаны ежегодные средние сезонные значения концентрации хлорофилла *a* за шесть месяцев (май, июнь, июль, август, сентябрь, октябрь) для всей площади акватории Онежского озера, что обусловлено временем активного развития фитопланктона в озере за вегетационный период. Сформировано осреднённое пространственное распределение концентрации хлорофилла *a* Онежского озера на основе среднестатистических данных за указанный период. Проведено сравнение результатов обработки спутниковых данных по концентрации хлорофилла *a* с натурными/судовыми данными, полученными в ходе экспедиционных исследований лабораторией гидробиологии Института водных проблем Севера Карельского научного центра РАН, и опубликованными в научной периодике. Проведённый регрессионный анализ временных рядов сезонной концентрации хлорофилла *a* показал, что многолетняя изменчивость его средней сезонной концентрации в поверхностных водах Онежского озера за период 1998–2022 гг. не обнаруживает статистически значимого тренда.

Ключевые слова: Онежское озеро, дистанционное зондирование по данным спутниковых датчиков цвета океана, долговременные временные ряды пространственной динамики концентрации хлорофилла *a*

Одобрена к печати: 01.12.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-6-289-302

Введение

Онежское озеро — крупный пресноводный водоём на европейском континенте — во многих аспектах является одним из весьма значимых ландшафтных элементов северо-запада России. Его условный водообмен (интенсивность водообмена) составляет 16 год^{-1} . В Онежское озеро впадает более 150 рек, а стоком для него становится р. Свирь, питающая Ладожское озеро (Калинкина и др., 2017; Крупнейшие..., 2015; Онежское..., 2010). Строение северного берега озера характеризуется наличием скалистых, глубоко врезаемых заливов и губ, тогда как южный берег изрезан слабо и имеет низменные берега. Традиционно выделяются основные лимнические районы Онежского озера (рис. 1, см. с. 290): Центральное, Южное, Большое и Малое Онего; Заонежский, Повенецкий заливы; Кондопожская и Петрозаводская губы (Крупнейшие..., 2015).

Сложное строение озёрной котловины, её морфометрический состав, неравномерное распределение притоков и антропогенной нагрузки определяют в совокупности пространственно-временное своеобразие гидрологических, гидрохимических и гидробиологических процессов по акватории Онежского озера.

Известно, что с 60-х гг. прошлого столетия и вплоть до начала нынешнего века трофический статус озера в целом оставался олиготрофным (Крупнейшие..., 2015). Однако показано, что состав вод и их трофический статус по конкретным районам Онежского озера существенно неоднородны (Крупнейшие..., 2015). Результатом многолетних поступлений сточных вод, обогащённых фосфором, с промышленных центров в Онежское озеро стало эвтрофирование

Кондопожской и Петрозаводской губ. Таким образом, качество воды в Кондопожской губе в открытый период зависит от синоптической ситуации и трофический статус оценивается как мезотрофный (Тимакова и др., 2014), а экосистема более проточной Петрозаводской губы характеризуется олиго-мезотрофным состоянием (Калинкина и др., 2017).

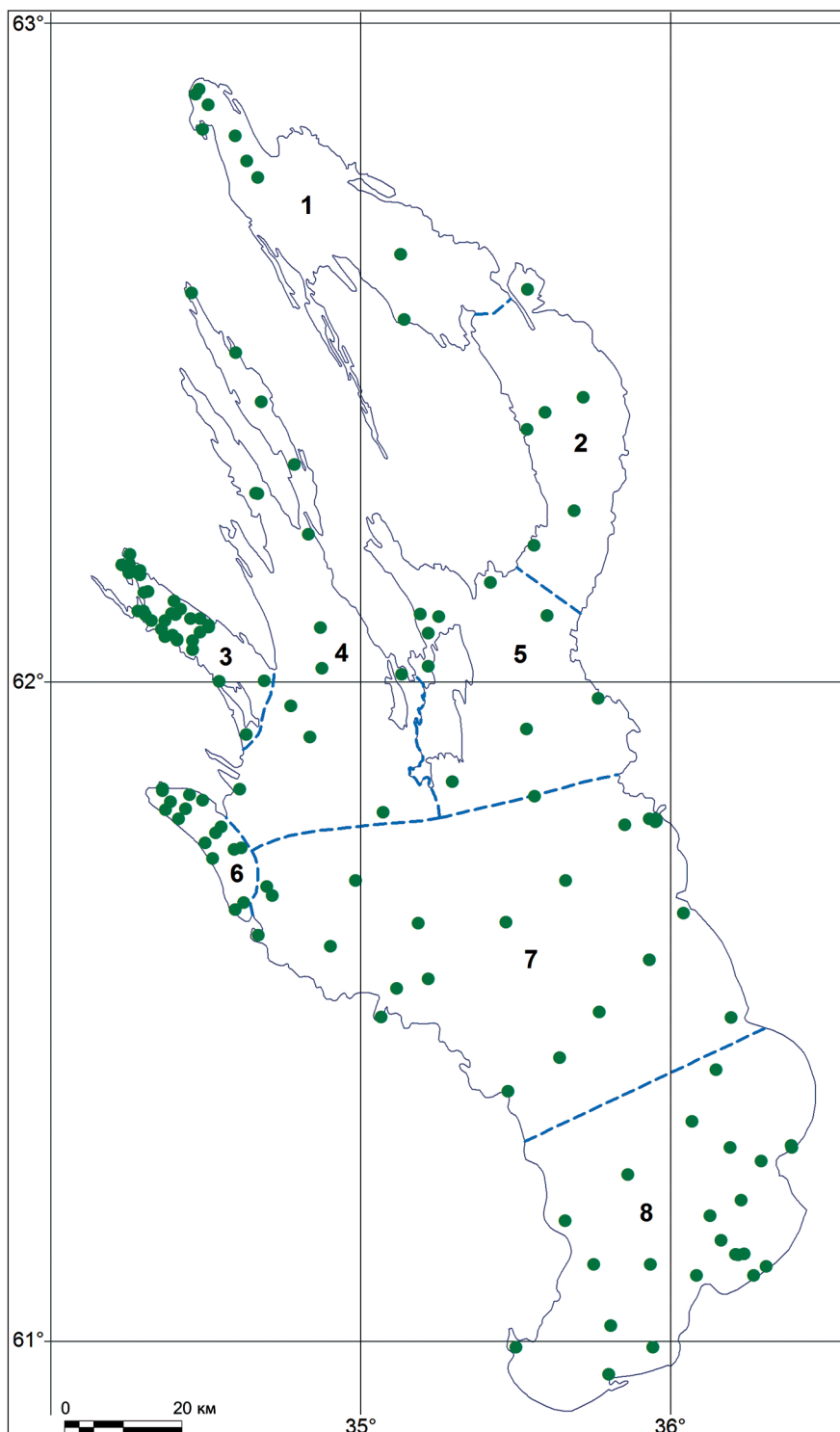


Рис. 1. Лимнические районы Онежского озера с расположением станций отбора проб концентрации Хл-*a* за 1998–2020 гг. с исследовательских судов в ходе экспедиционных работ (Калинкина и др., 2017, 2021; Крупнейшие..., 2015; Теканова, Тимакова, 2006; Теканова и др., 2018): 1 — Повенецкий зал., 2 — Заонежский зал., 3 — Кондопожская губа, 4 — Большое Онего, 5 — Малое Онего, 6 — Петрозаводская губа, 7 — Центральное Онего, 8 — Южное Онего

В целом воды Онежского озера прозрачны (среднее значение по акватории — 4,5 м), обладают низкой минерализованностью (35 мг/л) и слабо окрашены (20 град. цветности). В период открытой воды средняя концентрация общего фосфора за 1965–2009 гг. составляет 8 мкг/л (Сабылина и др., 2010), а хлорофилла *a* (Хл-*a*) — 1,1 мкг/л за 1960–2015 гг. (Калинкина и др., 2017). Величина средней биомассы фитопланктона не превышает 0,7 мг/л, а зоопланктона — 0,2 мг/л, что обуславливает низкие уровни рыбных уловов: в среднем они составляют около 1800 т в год (Биоресурсы..., 2008).

Будучи важным водным объектом многоцелевого хозяйственного использования на северо-западе страны, Онежское озеро требует регулярного и углублённого мониторинга динамики его экологического состояния. Основные факторы, которые могут привести к изменению состояния вод Онежского озера, — это антропогенное воздействие, биологическое загрязнение и климатические изменения (Крупнейшие..., 2015).

В совокупности с такими параметрами, как концентрация взвешенных частиц и окрашенного растворённого органического вещества, концентрация Хл-*a* становится одним из важнейших индикаторов трофического статуса и качества вод водоёма (Поздняков, Филатов, 2021; Dekker et al., 1995; Seegers et al., 2021). Примером могут служить многие федеральные и региональные программы США по мониторингу качества воды (например, Nutrient Criteria Technical Guidance Manual: Lakes and Reservoirs. EPA 822-B-00-001, National Lakes Assessment: A Collaborative Survey of the Nation's Lakes. EPA 841-R-09-001), которые во многом ориентированы на получение регулярных данных о концентрации Хл-*a* как приоритетной информации.

Наиболее распространённым подходом к получению данных о концентрации Хл-*a* является отбор проб на месте с плавательных средств. Этот метод обеспечивает высокое качество получаемых данных, однако имеет существенные недостатки, вытекающие из отсутствия регулярности данных во времени и пространстве. Особенно остро стоит проблема с большими по площади водоёмами, такими как Онежское озеро, что делает регулярный, статистически обеспеченный и обладающий требуемым разрешением по времени отбор проб для определения концентрации Хл-*a* (а также других параметров качества воды) дорогостоящим и сложным с точки зрения логистики, а во многих случаях даже невозможным по акватории озера (Kondratyev, Filatov, 1999; Papenfus et al., 2020). Отдельные или ограниченные по количеству и временным моментам взятия проб не позволяют осуществить полную оценку состояния всего водоёма (Lesht et al., 2018). Хотя временные ограничения и могут быть частично преодолены с помощью непрерывно работающих зондов, пространственное распределение данных остаётся недостаточно подробным (Suarez et al., 2019).

Методы дистанционного зондирования для оценки концентрации Хл-*a* по акватории озёр существенно дополняют натурные данные, поскольку такой подход решает проблемы пространственно-временных ограничений получаемых выборок. Кроме того, данные дистанционного зондирования эффективно используются для оценки долгосрочных изменений системы в широких пространственных и временных масштабах, а также для наблюдения быстро развивающихся (краткосрочных) событий, таких как эпизодическое цветение водорослей (Поздняков, Филатов, 2021; Pozdnyakov et al., 2013; Seegers et al., 2021). В целом данные дистанционного зондирования водоёмов позволяют делать статистически подтверждённые выводы о наличии Хл-*a* и его концентрации в поверхностных водах (Clark et al., 2017; Coffey et al., 2020).

Изучению трофического состояния крупных озёр (Великих Американских озёр, Онежского и Ладожского) на основе пространственно-временного распределения Хл-*a* по данным дистанционного зондирования посвящён ряд исследований (Поздняков, Филатов, 2021; Pozdnyakov et al., 2013). В работах (Поздняков, Филатов, 2021; Korosov et al., 2007; Morozov et al., 2022; Pozdnyakov et al., 2013) показано, что для Ладожского озера не наблюдается существенных изменений трофического состояния за последние годы (1998–2020), несмотря на достигнутое снижение поступления фосфора. Авторы указывают на то, что возвращение Ладожского озера в исходное олиготрофное состояние затруднено поступлением фосфора в озеро за счёт бактериально- или миколого-обусловленной деструкции растворённого аллохтонного органического вещества (Morozov et al., 2022).

Схожие исследования проведены и для Великих Американских озёр (Gons et al., 2008; Shuchman et al., 2013), где также выявлен феномен гистерезисного характера возвращения озёр к исходному трофическому уровню после прекращения/радикального снижения антропогенной нагрузки.

Наблюдения за параметрами, характеризующими экологическое состояние Онежского озера, регулярно ведутся на протяжении нескольких десятков лет Институтом водных проблем Севера Карельского научного центра РАН (ИВПС КарНЦ РАН) во время экспедиционных исследований, в ходе которых проводится отбор проб с научно-исследовательских судов (Крупнейшие..., 2015). На основании этих исследований (Филатов и др., 2012, 2014) удалось установить увеличение продолжительности «биологического лета» и существенное снижение численности и биомассы глубоководного бентоса (Калинкина и др., 2016). Биологическим летом считается период эффективной для биоты температуры воды (выше 10 °С) (Калинкина и др., 2017; Филатов и др., 2013). Результаты последних исследований (Калинкина и др., 2021) показывают, что Онежское озеро сохраняет низкий трофический статус и высокое качество воды, концентрация Хл-*a* в центральной части озера не превышает 3,2 мг/л.

Изучение динамики параметров качества вод Онежского озера (в том числе и концентрации Хл-*a*) осуществлялось также и с использованием спутниковых данных, в частности видимого диапазона (Крупнейшие..., 2015). В исследовании использованы данные, полученные в оптическом диапазоне спектрометром MERIS (*англ.* The Medium Resolution Imaging Spectrometer) за 2011 г. На основе этих данных впервые были получены пространственное распределение концентрации Хл-*a* высокого разрешения (300 м), позволяющее оценить сезонную динамику концентраций Хл-*a* в центральной части Онежского озера, а также в крупных заливах. Кроме того, в результате исследований оценки трофности Онежского озера, проведённых в 2021 г. (Коросов и др., 2021), разработана более детальная классификация отдельных частей его акватории по уровню трофности. За основу классификации приняты такие показатели, как количество сапрофитного бактериопланктона, биомасса рачкового зоопланктона, концентрация Хл-*a* и прозрачность воды. В работе (Коросов и др., 2021) показано, что воды Петрозаводской и Кондопожской губ не могут быть отнесены к акватории с низкой трофностью, при этом за 2000–2020 гг. трофность вод Центрального Онега в целом снизилась, а Кондопожской губы, напротив, возросла по сравнению с двумя временными отрезками 1982–2000 и 2000–2020 гг.

Даже в свете упомянутых выше исследований динамика пространственно-временной изменчивости концентрации Хл-*a*, равно как и прочих гидробиологических параметров Онежского озера, по-прежнему остаётся наименее изученной по сравнению с другими гидробиологическими характеристиками из-за неполноты и нерегулярности получаемых данных (Теканова и др., 2018). Между тем такая информация необходима в том числе и для оценки и сопоставления результатов расчётов существующих моделей экосистем Онежского озера (Isaev et al., 2020; Savchuk et al., 2022) — калибрации и верификации, поскольку имеющихся данных только экспедиционных исследований недостаточно для этих целей (Диагноз..., 2020).

В связи с этим цель настоящего исследования заключается в получении и систематизации данных о концентрации Хл-*a* в поверхностных водах Онежского озера по спутниковым наблюдениям за период 1998–2022 гг., а также анализ многолетней изменчивости концентрации Хл-*a* в поверхностных водах Онежского озера за период 1998–2022 гг.

Материалы и методы

В работе использованы ежедневные данные о концентрации Хл-*a* проекта GlobColour службы мониторинга морской среды CMEMS (*англ.* Copernicus Marine Environment Monitoring Service, <https://data.marine.copernicus.eu/products>) с пространственным разрешением 4×4 км, доступные за период с сентября 1997 г. по декабрь 2022 г. Массив GlobColour создан объединением данных с разных спутниковых датчиков: датчика с широким полем обзора SeaWiFS

(англ. Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor); спектрометров среднего разрешения MODIS (англ. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), находящихся на борту спутников Aqua и Terra; спектрометра среднего разрешения MERIS; набора датчиков видимого и инфракрасного (ИК) разрешения VIIRS-SNPP (англ. Visible Infrared Imaging Radiometer Suite — Suomi National Polar-orbiting Partnership) и JPSS1 (англ. Joint Polar Satellite System); прибора для фиксирования оптических характеристик океана и суши OLCI (англ. Ocean and Land Colour Instrument) спутников Sentinel-3A/B. Одной из характеристик этого набора является представление данных в виде многолетних временных рядов, что позволяет использовать их для научных целей с большей точностью, так как к ним применяется более совершенный алгоритм первичной обработки (Beckers, Rixen, 2003; Volpe et al., 2007, 2012, 2019), нежели к данным, получаемым в режиме реального времени. Используемые данные имеют четвёртый уровень обработки (L4), характеризующийся объединением нескольких алгоритмов дешифрирования концентрации Хл-*a*: CI — для олиготрофных вод, общий подход ОСх (англ. Ocean Color) (ОС3, ОС4 или ОС4Ме в зависимости от датчика) — для мезотрофных вод и алгоритм ОС5 — для вод прибрежных зон (Garnesson et al., 2019), а также пространственно-временной интерполяции объединённых массивов концентрации Хл-*a* для каждого датчика (Saulquin et al., 2019), что позволило минимизировать недостающие данные за пределами полос обзора датчиков и наличия облачности.

Кроме того, для сравнения результатов разных спутниковых данных в работе использован набор ОС-CCI (англ. Ocean Color Climate Change Initiative) Европейского космического агентства (англ. European Satellite Agency — ESA) версии 6.0. Этот набор представлен ежемесячными данными о концентрации Хл-*a* с пространственным разрешением 4×4 км за период с сентября 1997 г. по декабрь 2022 г. (<https://climate.esa.int/en/projects/ocean-colour/data/>). Набор формируется на основе данных MERIS, SeaWiFS, MODIS, VIIRS, Sentinel-3A/B — OLCI. Набор данных ОС-CCI задумывался для формирования многолетних временных рядов, которые необходимы для оценки климатических тенденций. Расчёты концентрации Хл-*a* выполнены на основе алгоритмов OCI, OCI2, OC2, OC3, ОСх (соотношение ОС3/ОС4) и ОС5, которые учитывают различные типы вод (Jackson et al., 2017; Moore et al., 2009).

Рассматриваемые наборы GlobColour и ОС-CCI различаются на этапе формирования массивов данных (Garnesson et al., 2019). Так, при формировании набора GlobColour концентрация Хл-*a* вычисляется для каждого датчика с учётом его характеристик (спектральный диапазон и разрешение), а затем полученные значения объединяются, тогда как получению концентрации Хл-*a* набора ОС-CCI предшествует объединение значений отражательной способности с разных датчиков.

Для каждого года за период 1998–2022 гг. нами были рассчитаны средне-сезонные значения Хл-*a* за шесть месяцев (май, июнь, июль, август, сентябрь, октябрь) для всей площади акватории Онежского озера, что обусловлено временем активного развития фитопланктона в озере за вегетационный период (Калинкина и др., 2017).

Расчёты и дополнительная обработка данных выполнены с помощью программного обеспечения (ПО), разработанного на языке программирования Python в рамках проекта Российского научного фонда (РНФ) № 22-17-00193. Данное ПО интегрировано с информационно-аналитической системой «Онежское озеро и его водосбор» для калибрации и верификации трёхмерной модели экосистемы Онежского озера, а также для визуализации и представления результатов расчётов и данных спутниковых наблюдений, в том числе о концентрации Хл-*a*.

Для сравнения результатов обработки спутниковых данных по концентрации Хл-*a* с натурными наблюдениями использованы данные, собранные с исследовательских судов на акватории Онежского озера в результате экспедиционных исследований ИВПС КарНЦ РАН за период 1998–2020 гг. (Калинкина и др., 2017, 2021; Крупнейшие..., 2015; Теканова, Тимакова, 2006; Теканова и др., 2018). Данные были структурированы и собраны в базу данных «Хлорофилл «а» в воде Онежского озера» (Сабылина и др., 2018). За период 1998–2020 гг. было собрано 2174 измерения концентрации Хл-*a* в поверхностных водах Онежского озера с мая по октябрь на 133 станциях отбора проб (см. рис. 1).

Сопоставление рядов отдельных значений концентраций Хл-*a*, полученных в ходе экспедиционных исследований, со спутниковыми наблюдениями осуществлялось с обеспечением пространственно-временной синхронности сравниваемых значений. Для этого была создана программа на языках программирования Matlab и Python, которая осуществляет процедуру выбора спутниковых данных из наборов GlobalColour и ОС-CCI, включая поиск значения по дате отбора проб, а также индексам широты и долготы, которые наиболее близко соответствуют географическим координатам станции отбора проб. Выбирались только те значения, которые были замерены в поверхностных водах озера (на глубине менее 1 м).

Среднее значение абсолютных ошибок определялось по формуле:

$$\bar{\delta} = \frac{\sum_{i=1}^n |chl_{in\ situ\ i} - chl_{sat\ i}|}{n},$$

где $chl_{in\ situ\ i}$ — *i*-е значение концентрации Хл-*a*, полученное в результате прямых измерений; $chl_{sat\ i}$ — *i*-е значение концентрации Хл-*a*, восстановленной из спутниковых данных; *n* — объём выборки.

Результаты

Анализ используемых в работе спутниковых данных по концентрации Хл-*a* показал, что массив GlobColour обеспечивает в значительной степени бóльшим пространственно-временным покрытием, чем ОС-CCI (рис. 2). Данные GlobColour обеспечили 85%-е покрытие по среднему значению концентрации Хл-*a* за период 1998–2022 гг., в то время как в случае ОС-CCI — лишь за 9-летний период: с 2002 по 2011 г. Проведённый регрессионный анализ временных рядов сезонных значений концентрации Хл-*a* продемонстрировал, что многолетняя изменчивость средней сезонной концентрации Хл-*a* в поверхностных водах Онежского озера за период 1998–2022 гг. не обнаруживает статистически значимого тренда ($R^2 = 0,03$; $p = 0,372$).

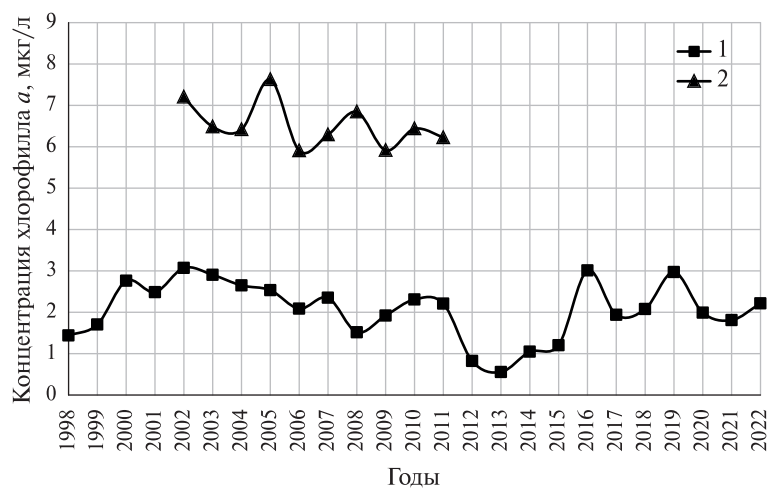


Рис. 2. Средние за сезон (май — октябрь) значения Хл-*a* в поверхностных водах Онежского озера за период 1998–2022 гг., рассчитанные по данным спутниковых наблюдений: 1 — GlobColour; 2 — ОС-CCI

Можно отметить, что между временными рядами данных GlobColour и ОС-CCI имеется умеренная корреляционная связь (коэффициент парной корреляции средних сезонных значений составляет 0,37), однако концентрация Хл-*a* в поверхностных водах Онежского озера по данным ОС-CCI имеет более высокие значения (в среднем в три раза), чем полученные по данным GlobColour.

Результаты сравнения спутниковой информации с имеющимися опубликованными натурными данными, полученными в результате экспедиционных исследований, показали, что данные GlobColour в большей степени согласуются с натурными данными, собранными с исследовательских судов на Онежском озере (Калинкина и др., 2017, 2021; Крупнейшие..., 2015; Теканова, Тимакова, 2006; Теканова и др., 2018), чем данные ОС-ССИ (табл. 1): средние значения абсолютных ошибок за период 1998–2020 гг. составляют 2,97 мкг/л ($n = 509$) и 5,24 мкг/л ($n = 33$) соответственно.

Таблица 1. Средние значения абсолютных ошибок ($\bar{\delta}$, мкг/л) спутниковых данных восстановления концентрации Хл-*a* за периоды 1998–2022 и 2002–2011 гг. соответственно по данным GlobColour и ОС-ССИ на основе сравнения с результатами экспедиционных исследований за период 1998–2022 гг. (Калинкина и др., 2017, 2021; Крупнейшие..., 2015; Сабылина и др., 2018; Теканова, Тимакова, 2006; Теканова и др., 2018)

Районы	GlobalColour	ОС-ССИ
Южное Онего	2,11	4,36
Центральное Онего	2,09	4,71
Большое Онего	3,23	5,76
Малое Онего	3,72	6,31
Петрозаводская губа	3,40	7,34
Кондопожская губа	3,56	6,16
Заонежский зал.	2,69	–
Повенецкий зал.	2,75	9,60

В связи с этим в настоящей работе статистическая оценка межгодовой изменчивости концентрации Хл-*a* в поверхностных водах Онежского озера выполнена по данным GlobColour.

В пользу сделанного выбора свидетельствует и тот факт, что полученные значения концентрации Хл-*a* (мкг/л) в ходе экспедиционных исследований в августе 2017 г. варьируют в интервале 2,0–3,2 мкг/л для вод центральной и южной частей Онежского озера (Теканова и др., 2018) и оказываются в близком соответствии с оценками значения этого параметра (2,47 мкг/л) на тот же год и месяц по данным GlobColour в августе 2017 г. Осреднённая концентрация Хл-*a* в июне на основе собранных натурных данных за период 2001–2019 гг. для вод центральной части Онежского озера также имеет значения, схожие с полученными по данным GlobColour (соответственно 0,3–0,9 и 0,89 мкг/л) (Калинкина и др., 2021).

Максимальные (более 3 мкг/л) значения сезонной концентрации Хл-*a* в поверхностных водах акватории Онежского озера за рассматриваемый период по данным GlobColour наблюдались в 2002, 2003, 2016 и 2018 гг. (см. рис. 2); при этом максимальное среднемесячное значение концентрации Хл-*a* отмечалось в сентябре 2003 г. (более 6 мкг/л); минимальные значения концентрации Хл-*a* зарегистрированы в 2012 и 2013 гг. (менее 0,6 мкг/л). Максимальная средняя концентрация Хл-*a* за июнь в центральной части Онежского озера отмечалась в 2020 г. (3,22 мкг/л), что весьма хорошо согласуется с концентрацией Хл-*a* (2,48 мкг/л) за этот период, полученной в ходе экспедиционных работ по изучению реакции экосистемы Онежского озера в весенне-летнее время на аномально высокую температуру воздуха зимой 2019/2020 гг.

Осреднённые схемы пространственного распределения концентрации Хл-*a* по акватории Онежского озера, полученные осреднением данных GlobColour за каждый месяц (май – октябрь) периода 1998–2022 гг., представлены на рис. 3 (см. с. 296).

Следует отметить, что концентрация Хл-*a* в целом по акватории озера распределяется приблизительно равными значениями, однако в июне, июле, августе можно наблюдать более высокие величины в Уницкой губе (3,0–6,0 мкг/л), Повенецком зал. (3,0–4,0 мкг/л), а также

в южной части Онежского озера (2,5–3,0 мкг/л). В сентябре и октябре высокая концентрация Хл-*a* отмечается в Заонежском зал. (4,0–4,5 мкг/л).

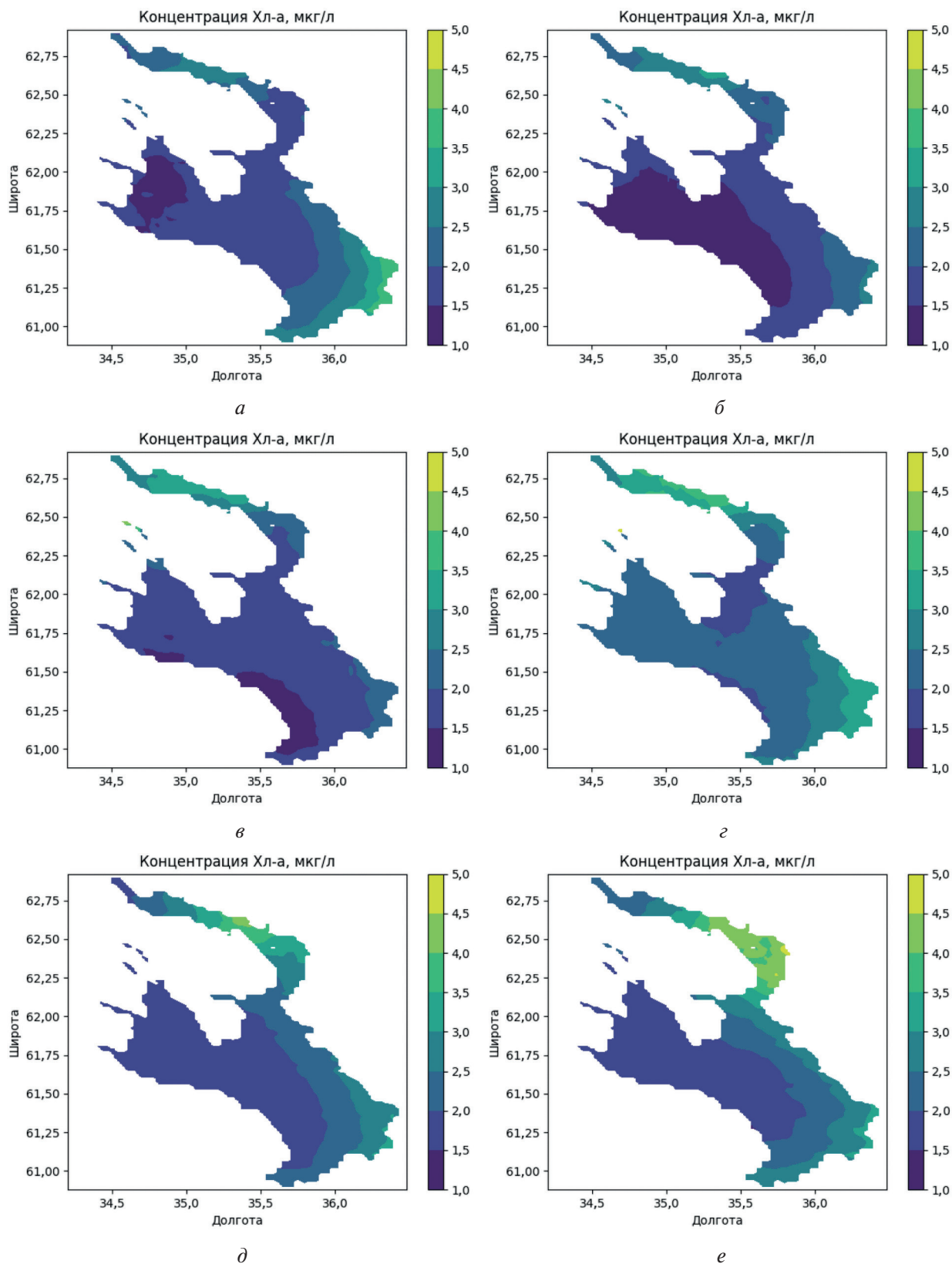


Рис. 3. Осреднённое пространственное распределение концентрации Хл-*a* (мкг/л) в поверхностных водах Онежского озера за 1998–2022 гг., построенное по спутниковым данным GlobColour: *a* — май; *б* — июнь; *в* — июль; *г* — август; *д* — сентябрь; *е* — октябрь

Эти результаты согласуются с пространственным распределением концентрации Хл-*a*, полученным по спутниковым данным MERIS/Envisat (*англ.* Environmental Satellite) (Крупнейшие..., 2015): по обоим источникам в некоторых заливах Онежского озера зафиксированы высокие значения концентрации Хл-*a* (табл. 2).

Таблица 2. Сравнение спутниковых данных MERIS/Envisat и GlobColour по среднемесячным значениям концентрации Хл-*a* (мкг/л) за август 2011 г. в некоторых районах Онежского озера

Районы Онежского озера	MERIS/Envisat	GlobColour
Уницкая губа	4,0–5,0	3,0–6,0
Повенецкий зал.	4,0–5,0	3,0–4,0
Южная часть	3,0–3,5	2,5–3,0

Обсуждение результатов и выводы

Отсутствие статистически значимого тренда многолетней изменчивости концентрации Хл-*a* в поверхностных водах Онежского озера за период наблюдений 1998–2022 гг. (см. *рис. 2*) по данным GlobColour подтверждает результаты ранее проведенных судовых исследований за 2000–2020 гг. (Калинкина и др., 2021; Коросов и др., 2021; Крупнейшие..., 2015; Теканова и др., 2018). Концентрация Хл-*a* в поверхностных водах Онежского озера не претерпела значительных изменений за последние 20 лет и, согласно классификации С. П. Китаева (Китаев, 2007), подтверждает сохранение олиготрофного статуса озера. Этому в большой степени способствует улучшение работы очистных сооружений в городах, расположенных на побережье озера, а также снижение количества сточных вод, поступающих в Онежское озеро от промышленных предприятий (Калинкина и др., 2017).

При всей предпочтительности использования спутниковых данных GlobColour по концентрации Хл-*a* в сравнении с аналогичными данными ОС-ССИ полученное осредненное пространственно-временное распределение этого параметра в поверхностных водах Онежского озера не избавлено от неточностей, особенно в случае небольших заливов, для вод которых характерны высокие уровни мутности и окрашенности. В частности, спутниковые данные по таким участкам акватории Онежского озера не отражают тех высоких значений концентрации Хл-*a*, которые были выявлены в ходе судовых исследований.

Однако в случае больших заливов/губ, таких как Петровская и Кондопожская губы, спутниковые данные по концентрации Хл-*a* в поверхностных водах оказываются вполне адекватными.

В целом можно с уверенностью констатировать, что спутниковые наблюдения за трофическим статусом Онежского озера представляют уникальные на сегодняшний день возможности выявления наиболее характерных черт пространственно-временной динамики распределения концентрации Хл-*a* как важного индикатора трофического состояния водоёма по акватории такого большого и важного для многоцелевого хозяйственного использования водного объекта, как Онежское озеро.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта РНФ № 22-17-00193. Авторы благодарят доктора физико-математических наук профессора Д. В. Позднякова и члена-корреспондента РАН профессора Н. Н. Филатова за полезные замечания при подготовке рукописи.

Литература

1. Биоресурсы Онежского озера / ред. Лукин А. А., Кухарев В. И. Петрозаводск: Карельский науч. центр РАН, 2008. 272 с.
2. Диагноз и прогноз термогидродинамики и экосистем великих озер России / ред. Филатов Н. Н. Петрозаводск: Карельский науч. центр РАН, 2020. 255 с.

3. Калинкина Н. М., Сидорова А. И., Полякова Т. Н. и др. Снижение численности глубоководного макрозообентоса Онежского озера в условиях многофакторного воздействия // Принципы экологии. 2016. Т. 5. № 2. С. 47–68. DOI: 10.15393/j1.art.2016.5182.
4. Калинкина Н. М., Теканова Е. В., Сярки М. Т. Экосистема Онежского озера: реакция водных сообществ на антропогенные факторы и климатические изменения // Водное хоз-во России: проблемы, технологии, управление. 2017. № 1. С. 4–18. DOI: 10.35567/1999-4508-2017-1-1.
5. Калинкина Н. М., Теканова Е. В., Ефремова Т. В. и др. Реакция экосистемы Онежского озера в весенне-летний период на аномально высокую температуру воздуха зимы 2019/2020 годов // Изв. Российской акад. наук. Сер. географическая. 2021. Т. 85. № 6. С. 888–899. DOI: 10.31857/S2587556621060078.
6. Китаев С. П. Основы лимнологии для гидробиологов и ихтиологов. Петрозаводск: Карельский науч. центр РАН, 2007. 395 с.
7. Коросов А. В., Калинкина Н. М., Теканова Е. В. и др. Разработка индексов трофности для Онежского озера с помощью экологической информационной системы // ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформац. обеспечение устойчивого развития территорий: материалы междунар. конф. М: Геогр. ф-т МГУ, 2021. Т. 27. Ч. 3. С. 256–273. DOI: 10.35595/2414-9179-2021-3-27-256-273.
8. Крупнейшие озера-водохранилища Северо-Запада европейской территории России: современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях / ред. Филатов Н. Н., Калинкина Н. М., Куликова Т. П., Литвиненко А. В., Лозовик П. А. Петрозаводск: Карельский науч. центр РАН, 2015. 375 с.
9. Онежское озеро: Атлас / отв. ред. Филатов Н. Н. Петрозаводск: Карельский науч. центр РАН, 2010. 151 с.
10. Поздняков Д. В., Филатов Н. Н. Вариации качества воды в Ладожском озере в весенний период в 2016 и 2017 гг.: спутниковые наблюдения // Фундам. и приклад. гидрофизика. 2021. Т. 14. № 1. С. 79–85. DOI: 10.7868/S2073667321010081.
11. Сабылина А. В., Лозовик П. А., Зобков М. Б. Химический состав воды Онежского озера и его притоков // Водные ресурсы. 2010. Т. 37. № 6. С. 717–729.
12. Сабылина А. В., Теканова Е. В., Калинкина Н. М. Хлорофилл «а» в воде Онежского озера. Свидетельство о гос. регистрации базы данных № 2018621068. Рег. 13.06.2018.
13. Теканова Е. В., Тимакова Т. М. Первичная продукция и деструкция органического вещества в Онежском озере // Состояние и проблемы продукционной гидробиологии. М.: КМК, 2006. С. 60–70.
14. Теканова Е. В., Калинкина Н. М., Здоровеннов Р. Э., Макарова Е. М. Результаты исследования экосистемы Онежского озера в период летней стратификации по данным экспедиции 2017 г. // Тр. Карельского науч. центра РАН. 2018. № 9. С. 44–53. DOI: 10.17076/lim753.
15. Тимакова Т. М., Куликова Т. П., Литвинова И. А. и др. Изменение биоценозов Кондопожской губы Онежского озера под влиянием сточных вод целлюлозно-бумажного комбината // Водные ресурсы. 2014. Т. 41. № 1. С. 74–82. DOI: 10.7868/S032105961401012X.
16. Филатов Н. Н., Георгиев А. П., Ефремова Т. В. и др. Реакция озер Восточной Фенноскандии и Восточной Антарктиды на изменения климата // Докл. Акад. наук. 2012. Т. 444. № 5. С. 1–4. DOI: 10.1134/S1028334X1206013X.
17. Филатов Н. Н., Руховец Л. А., Назарова Л. Е., Баклагин В. А., Георгиев А. П., Ефремова Т. В., Пальшин Н. И., Толстиков А. В., Шаров А. Н. Влияние изменений климата на экосистемы озер // Вестн. Российского фонда фундам. исслед. 2013. Т. 78. № 2. С. 43–50.
18. Филатов Н. Н., Руховец Л. А., Назарова Л. Е. и др. Влияние изменений климата на экосистемы озер севера европейской территории России // Ученые записки Российского гос. гидрометеорол. ун-та. 2014. № 34. С. 48–55. DOI: 10.6084/M9.FIGSHARE.5821461.V2.
19. Beckers J. M., Rixen M. EOF calculations and data filling from incomplete oceanographic datasets // J. Atmospheric and Oceanic Technology. 2003. V. 20. P. 1839–1856. DOI: 10.1175/1520-0426(2003)020<1839:ECADFF>2.0.CO;2.
20. Clark J., Schaeffer B. A., Darling J. et al. Satellite monitoring of cyanobacterial harmful algal bloom frequency in recreational waters and drinking water sources // Ecological Indicators. 2017. V. 80. P. 84–95. DOI: 10.1016/j.ecolind.2017.04.046.
21. Coffer M., Schaeffer B. A., Darling J., Urquhart E., Salls W. Quantifying national and regional cyanobacterial occurrence in US lakes using satellite remote sensing // Ecological Indicators. 2020. V. 111. Article 105976. DOI: 10.1016/j.ecolind.2019.
22. Dekker A. G., Malthus T. J., Hoogenboom H. J. The remote sensing of inland water quality // Advances in Environmental Remote Sensing. Chichester, United Kingdom: John Wiley and Sons, 1995. P. 123–142.
23. Garnesson P., Mangin A., Fanton d'Andon O., Demaria J., Bretagnon M. The CMEMS GlobColour chlorophyll *a* product based on satellite observation: Multi-sensor merging and flagging strategies // Ocean Science. 2019. V. 15. No. 3. P. 819–830. DOI: 10.5194/os-15-819-2019.

24. Gons H. J., Auer M. T., Effler S. W. MERIS satellite chlorophyll mapping of oligotrophic and eutrophic waters in the Laurentian Great Lakes // *Remote Sensing of Environment*. 2008. V. 112. No. 11. P. 4098–4106. DOI: 10.1016/j.rse.2007.06.029.
25. Jackson T., Sathyendranath S., Mélin F. An improved optical classification scheme for the Ocean Colour Essential Climate Variable and its applications // *Remote Sensing of Environment*. 2017. V. 203. P. 152–161. DOI: 10.1016/j.rse.2017.03.036.
26. Isaev A., Vladimirova O., Eremina T., Ryabchenko V., Savchuk O. Accounting for Dissolved Organic Nutrients in an SPBEM-2 Model: Validation and Verification // *Water*. 2020. V. 12. Article 1307. DOI: 10.3390/w12051307.
27. Kondratyev K. Y., Filatov N. N. *Limnology and remote sensing: a contemporary approach*. L., United Kingdom: Praxis Publishing Ltd, 1999. 406 p.
28. Korosov A. A., Pozdnyakov D. V., Pettersson L. H., Grassl H. Satellite-data-based study of seasonal and spatial variations of water temperature and water quality parameters in Lake Ladoga // *J. Applied Remote Sensing*. 2007. V. 1. No. 1. Article 011508. DOI: 10.1117/1.2834770.4.
29. Lesht B. M., Barbiero R. P., Warren G. J. Using satellite observations to assess the spatial representativeness of the GLNPO water quality monitoring program // *J. Great Lakes Research*. 2018. V. 44. No. 4. P. 547–562. DOI: 10.1016/j.jglr.2018.05.001.
30. Moore T. S., Campbell J. W., Dowell M. D. A class-based approach to characterizing and mapping the uncertainty of the MODIS ocean chlorophyll product // *Remote Sensing of Environment*. 2009. V. 113. No. 11. P. 2424–2430. DOI: 10.1016/j.rse.2009.07.016.
31. Morozov E. A., Pozdnyakov D. V., Filatov N. N., Ignateva E. S. Biogeochemical Changes in Lake Ladoga: Insights from Satellite Data // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2022. V. 58. P. 1494–1508. DOI: 10.1134/S0001433822120167.
32. Papenfus M., Schaeffer B. A., Pollard A. I., Loftin K. A. Exploring the potential value of satellite remote sensing to monitor chlorophyll-*a* for US lakes and reservoirs // *Environmental Monitoring and Assessment*. 2020. V. 192. No. 12. P. 1–22. DOI: 10.1007/s10661-020-08631-5.
33. Pozdnyakov D. V., Korosov A. A., Petrova N. A., Grassl H. Multi-year satellite observations of Lake Ladoga's biogeochemical dynamics in relation to the lake's trophic status // *J. Great Lakes Research*. 2013. V. 39. No. 1. P. 34–45. DOI: 10.1016/j.jglr.2013.05.002.
34. Saulquin B., Gohin F., Fanton d'Andon O. Interpolated fields of satellite-derived multi-algorithm chlorophyll-*a* estimates at global and European scales in the frame of the European Copernicus-Marine Environment Monitoring Service // *J. Operational Oceanography*. 2019. V. 12. No. 1. P. 47–57. DOI: 10.1080/1755876X.2018.1552358.
35. Savchuk O. P., Isaev A. V., Filatov N. N. Three-dimensional hindcast of nitrogen and phosphorus biogeochemical dynamics in Lake Onego Ecosystem, 1985–2015. Part II: seasonal dynamics and spatial features; integral fluxes // *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2022. V. 15. No. 2. P. 98–109. DOI: 10.48612/fpg/9mg5-run6-4zr8.
36. Seegers B. N., Werdell P. J., Vandermeulen R. A. et al. Satellites for long-term monitoring of inland U.S. lakes: The MERIS time series and application for chlorophyll-*a* // *Remote Sensing of Environment*. 2021. V. 266. Article 112685. DOI: 10.1016/j.rse.2021.112685.
37. Shuchman R. A., Leshkevich G., Sayers M. J. et al. An algorithm to retrieve chlorophyll, dissolved organic carbon, and suspended minerals from Great Lakes satellite data // *J. Great Lakes Research*. 2013. V. 39. No. 1. P. 14–33. DOI: 10.1016/j.jglr.2013.06.017.
38. Suarez E. L., Tiffay M.-C., Kalinkina N. et al. Diurnal variation in the convection-driven vertical distribution of phytoplankton under ice and after ice-off in large Lake Onego (Russia) // *Inland Waters*. 2019. V. 9. No. 2. P. 193–204. DOI: 10.1080/20442041.2018.1559582.
39. Volpe G., Santoleri R., Vellucci V. et al. The colour of the Mediterranean Sea: Global versus regional bio-optical algorithms evaluation and implication for satellite chlorophyll estimates // *Remote Sensing of Environment*. 2007. V. 107. No. 4. P. 625–638. DOI: 10.1016/j.rse.2006.10.017.
40. Volpe G., Colella S., Forneris V., Tronconi C., Santoleri R. The Mediterranean Ocean Colour Observing System – system development and product validation // *Ocean Science*. 2012. V. 8. No. 5. P. 869–883. DOI: 10.5194/os-8-869-2012.
41. Volpe G., Colella S., Brando V. et al. The Mediterranean Ocean Colour Level 3 Operational Multi-Sensor Processing // *Ocean Science*. 2019. V. 15. No. 1. P. 127–146. DOI: 10.5194/os-15-127-2019.

Dynamics of chlorophyll *a* concentration in Lake Onego according to satellite observations in 1998–2022

V. N. Baklagin, I. S. Novikova

Northern Water Problems Institute of Karelian Research Centre RAS
Petrozavodsk 185030, Russia
E-mail: slava.baklagin@mail.ru

The work is devoted to assessing the long-term variability of chlorophyll *a* concentration in the surface waters of Lake Onego based on satellite data for 1998–2022. Satellite data sets provided by the GlobColour product of the Copernicus marine environmental monitoring service and the Ocean Color Climate Change Initiative product of the European Space Agency were used. The average seasonal values of chlorophyll *a* concentration for six months (May, June, July, August, September, and October) were calculated for the entire area of Lake Onego, which is conditioned by the period of active development of phytoplankton in the lake during the growing season. Averaged spatial distributions of chlorophyll *a* concentration were formed based on average statistical data on chlorophyll *a* concentration for the specified period. A comparison was made of the results of processing of the satellite data on chlorophyll *a* concentration with field/ship data obtained during expeditionary research by the Laboratory of Hydrobiology of the Northern Water Problems Institute of Karelian Scientific Center RAS and published in scientific periodicals. The regression analysis of time series of seasonal values of chlorophyll *a* concentration showed that the long-term variability of average seasonal concentration of chlorophyll *a* in surface waters of Lake Onego does not reveal a statistically significant trend in 1998–2022.

Keywords: Lake Onego, remote sensing according to satellite ocean color sensors, long-term time series of spatial dynamics of chlorophyll *a* concentration

Accepted: 01.12.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-6-289-302

References

1. *Bioresursy Onezhskogo ozera* (Bioresources of Lake Onego), Lukin A. A., Kukharev V. I. (eds.), Petrozavodsk: KRC RAN, 2008, 272 p. (in Russian).
2. *Diagnoz i prognoz termogidrodinamiki i ekosistem velikikh ozer Rossii* (Diagnosis and forecast of thermohydrodynamics and ecosystems of the Great Lakes of Russia), Filatov N. N. (ed.), Petrozavodsk: KRC RAN, 2020, 255 p. (in Russian).
3. Kalinkina N., Sidorova A., Polyakova T. et al., Decline in the deepwater benthic communities abundance in the Onego Lake under multifactor influence, *Principles of the Ecology*, 2016, No. 2, pp. 43–61 (in Russian), DOI: 10.15393/j1.art.2016.5182.
4. Kalinkina N. M., Tekanova E. V., Syarki M. T., Ecosystem of Lake Onego: unusual aquatic communities on anthropogenic factors and climate change, *Water sector of Russia: problems, technologies, management*, 2017, No. 1, pp. 4–18 (in Russian), DOI: 10.35567/1999-4508-2017-1-1.
5. Kalinkina N. M., Tekanova E. V., Efremova T. V. et al., Response of Lake Onego ecosystem in the spring–summer period to anomaly high air temperature in winter 2019/2020, *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya*, 2021, Vol. 85, No. 6, pp. 888–899 (in Russian), DOI: 10.31857/S2587556621060078.
6. Kitaev S. P., *Osnovy limnologii dlya gidrobiologov i ikhtiologov* (Fundamentals of limnology for hydrobiologists and ichthyologists), Petrozavodsk: KSC RAN, 2007, 395 p. (in Russian).
7. Korosov A. V., Kalinkina N. M., Tekanova E. V. et al., Development of trophic indices for lake Onego using of the ecological information system, *InterKarto. InterGIS. Geoinformatsionnoe obespechenie ustoychivogo razvitiya territorii* (InterCarto. InterGIS. GI support of sustainable development of territories), Proc. Intern. Conf., Moscow: MSU, Faculty of Geography, 2021, Vol. 27, Pt. 3, pp. 256–273 (in Russian), DOI: 10.35595/2414-9179-2021-3-27-256-273.
8. *Krupneishie ozera-vodokhranilishcha Severo-Zapada evropeiskoi territorii Rossii: sovremennoe sostoyanie i izmeneniya ekosistem pri klimaticheskikh i antropogennykh vozdeistviyakh* (The Largest Lakes and reservoirs in the North-West of European Russia: current state and changes in ecosystems under climatic and anthro-

- pogenic influences), Filatov N. N., Kalinkina N. M., Kulikova T. P., Litvinenko A. V., Lozovik P. A. (eds.), Petrozavodsk: KSC RAN, 2015, 375 p. (in Russian).
9. *Onezhskoe ozero: Atlas* (Lake Onego: Atlas), Filatov N. N. (ed.), Petrozavodsk: KSC RAN, 2010, 151 p. (in Russian).
 10. Pozdnyakov D. V., Filatov N. N., Interannual water quality variations in lake Ladoga in spring during 2016 and 2017: satellite observations, *Fundamental and Applied Hydrophysics*, 2021, Vol. 14, No. 1, pp. 79–85 (in Russian), DOI: 10.7868/S2073667321010081.
 11. Sabylina A. V., Lozovik P. A., Zobkov M. B., Water chemistry in Onego lake and its tributaries, *Water Resources*, 2010, Vol. 37, No. 6, pp. 842–853, DOI: 10.1134/S0097807810060102.
 12. Sabylina A. V., Tekanova E. V., Kalinkina N. M., *Khlorofill "a" v vode Onezhskogo ozera* (Chlorophyll-a base in the water of Lake Onego), Certificate of state registration of data base No. 2018621068 (RU), Reg. 06.13.2018.
 13. Tekanova E. V., Timakova T. M., Primary production and destruction of organic matter in Lake Onego, *Sostoyanie i problemy produktivnoy gidrobiologii*, Moscow: KMK, 2006, pp. 60–70 (in Russian).
 14. Tekanova E. V., Kalinkina N. M., Zdorovenno R. E., Makarova E. M., Results of the study of Lake Onego ecosystem in the period of summer stratification based on measured data from a 2017 expedition, *Trans. Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences*, 2018, No. 9, pp. 44–53 (in Russian), DOI: 10.17076/lim753.
 15. Timakova T. M., Kulikova T. P., Litvinova I. A. et al., Changes in biocenoses of Kondopoga Bay, Lake Onego, under the effect of effluents from a pulp and paper mill, *Water Resources*, 2014, Vol. 41, No. 1, pp. 78–86, DOI: 10.1134/S0097807814010126.
 16. Filatov N. N., Georgiev A. P., Efremova T. V. et al., Response of lakes in Eastern Fennoscandia and Eastern Antarctica to climate changes, *Doklady Earth Sciences*, 2012, Vol. 444, No. 2, pp. 1–4 (in Russian), DOI: 10.1134/S1028334X1206013X.
 17. Filatov N. N., Rukhovets L. A., Nazarova L. E., Baklagin V. A., Georgiev A. P., Efremova T. V., Palshin N. I., Tolstikov A. V., Sharov A. N., Climate change of the lake ecosystem, *Vestnik RFFI*, 2013, Vol. 78, No. 2, pp. 43–50 (in Russian).
 18. Filatov N. N., Rukhovets L. A., Nazarova L. E. et al., The features of the climate change impact to the ecosystems of lakes located in a fairly strong anthropogenic influence on the example of the lakes of the North European part of Russia, *Uchenye zapiski Rossiiskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta*, 2014, No. 34, pp. 48–55 (in Russian), DOI: 10.6084/M9.FIGSHARE.5821461.V2.
 19. Beckers J. M., Rixen M., EOF calculations and data filling from incomplete oceanographic datasets, *J. Atmospheric and Oceanic Technology*, 2003, Vol. 20, pp. 1839–1856, DOI: 10.1175/1520-0426(2003)020<1839:ECADFF>2.0.CO;2.
 20. Clark J., Schaeffer B. A., Darling J. et al., Satellite monitoring of cyanobacterial harmful algal bloom frequency in recreational waters and drinking water sources, *Ecological Indicators*, 2017, Vol. 80, pp. 84–95, DOI: 10.1016/j.ecolind.2017.04.046.
 21. Coffey M., Schaeffer B. A., Darling J., Urquhart E., Salls W., Quantifying national and regional cyanobacterial occurrence in US lakes using satellite remote sensing, *Ecological Indicators*, 2020, Vol. 111, Article 105976, DOI: 10.1016/j.ecolind.2019.
 22. Dekker A. G., Malthus T. J., Hoogenboom H. J., The remote sensing of inland water quality, In: *Advances in Environmental Remote Sensing*, Chichester, United Kingdom: John Wiley and Sons, 1995, pp. 123–142.
 23. Garnesson P., Mangin A., Fanton d'Andon O., Demaria J., Bretagnon M., The CMEMS GlobColour chlorophyll a product based on satellite observation: Multi-sensor merging and flagging strategies, *Ocean Science*, 2019, Vol. 15, No. 3, pp. 819–830, DOI: 10.5194/os-15-819-2019.
 24. Gons H. J., Auer M. T., Effler S. W., MERIS satellite chlorophyll mapping of oligotrophic and eutrophic waters in the Laurentian Great Lakes, *Remote Sensing of Environment*, 2008, Vol. 112, No. 11, pp. 4098–4106, DOI: 10.1016/j.rse.2007.06.029.
 25. Jackson T., Sathyendranath S., Mélin F., An improved optical classification scheme for the Ocean Colour Essential Climate Variable and its applications, *Remote Sensing of Environment*, 2017, Vol. 203, pp. 152–161, DOI: 10.1016/j.rse.2017.03.036.
 26. Isaev A., Vladimirova O., Eremina T., Ryabchenko V., Savchuk O., Accounting for Dissolved Organic Nutrients in an SPBEM-2 Model: Validation and Verification, *Water*, 2020, Vol. 12, Article 1307, DOI: 10.3390/w12051307.
 27. Kondratyev K. Y., Filatov N. N., *Limnology and remote sensing: a contemporary approach*, London, United Kingdom: Praxis Publishing Ltd, 1999, 406 p.
 28. Korosov A. A., Pozdnyakov D. V., Pettersson L. H., Grassl H., Satellite-data-based study of seasonal and spatial variations of water temperature and water quality parameters in Lake Ladoga, *J. Applied Remote Sensing*, 2007, Vol. 1, No. 1, Article 011508, DOI: 10.1117/1.2834770.4.
 29. Lesht B. M., Barbiero R. P., Warren G. J., Using satellite observations to assess the spatial representativeness of the GLNPO water quality monitoring program, *J. Great Lakes Research*, 2018, Vol. 44, No. 4, pp. 547–562, DOI: 10.1016/j.jglr.2018.05.001.

30. Moore T. S., Campbell J. W., Dowell M. D., A class-based approach to characterizing and mapping the uncertainty of the MODIS ocean chlorophyll product, *Remote Sensing of Environment*, 2009, Vol. 113, No. 11, pp. 2424–2430, DOI: 10.1016/j.rse.2009.07.016.
31. Morozov E. A., Pozdnyakov D. V., Filatov N. N., Ignateva E. S., Biogeochemical Changes in Lake Ladoga: Insights from Satellite Data, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2022, Vol. 58, pp. 1494–1508, DOI: 10.1134/S0001433822120167.
32. Papenfus M., Schaeffer B. A., Pollard A. I., Loftin K. A., Exploring the potential value of satellite remote sensing to monitor chlorophyll-*a* for US lakes and reservoirs, *Environmental Monitoring and Assessment*, 2020, Vol. 192, No. 12, pp. 1–22, DOI: 10.1007/s10661-020-08631-5.
33. Pozdnyakov D. V., Korosov A. A., Petrova N. A., Grassl H., Multi-year satellite observations of Lake Ladoga's biogeochemical dynamics in relation to the lake's trophic status, *J. Great Lakes Research*, 2013, Vol. 39, No. 1, pp. 34–45, DOI: 10.1016/j.jglr.2013.05.002.
34. Savchuk O. P., Isaev A. V., Filatov N. N., Three-dimensional hindcast of nitrogen and phosphorus biogeochemical dynamics in Lake Onego Ecosystem, 1985–2015. Part II: seasonal dynamics and spatial features; integral fluxes, *Fundamental and Applied Hydrophysics*, 2022, Vol. 15, No. 2, pp. 98–109, DOI: 10.48612/fpg/9mg5-run6-4zr8.
35. Saulquin B., Gohin F., Fanton d'Andon O., Interpolated fields of satellite-derived multi-algorithm chlorophyll-*a* estimates at global and European scales in the frame of the European Copernicus-Marine Environment Monitoring Service, *J. Operational Oceanography*, 2019, Vol. 12, No. 1, pp. 47–57, DOI: 10.1080/1755876X.2018.1552358.
36. Seegers B. N., Werdell P. J., Vandermeulen R. A. et al., Satellites for long-term monitoring of inland U.S. lakes: The MERIS time series and application for chlorophyll-*a*, *Remote Sensing of Environment*, 2021, Vol. 266, Article 112685, DOI: 10.1016/j.rse.2021.112685.
37. Shuchman R. A., Leshkevich G., Sayers M. J. et al., An algorithm to retrieve chlorophyll, dissolved organic carbon, and suspended minerals from Great Lakes satellite data, *J. Great Lakes Research*, 2013, Vol. 39, No. 1, pp. 14–33, DOI: 10.1016/j.jglr.2013.06.017.
38. Suarez E. L., Tiffay M.-C., Kalinkina N. et al., Diurnal variation in the convection-driven vertical distribution of phytoplankton under ice and after ice-off in large Lake Onego (Russia), *Inland Waters*, 2019, Vol. 9, No. 2, pp. 193–204, DOI: 10.1080/20442041.2018.1559582.
39. Volpe G., Santoleri R., Vellucci V. et al., The colour of the Mediterranean Sea: Global versus regional bio-optical algorithms evaluation and implication for satellite chlorophyll estimates, *Remote Sensing of Environment*, 2007, Vol. 107, No. 4, pp. 625–638, DOI: 10.1016/j.rse.2006.10.017.
40. Volpe G., Colella S., Forneris V., Tronconi C., Santoleri R., The Mediterranean Ocean Colour Observing System — system development and product validation, *Ocean Science*, 2012, Vol. 8, No. 5, pp. 869–883, DOI: 10.5194/os-8-869-2012.
41. Volpe G., Colella S., Brando V. et al., The Mediterranean Ocean Colour Level 3 Operational Multi-Sensor Processing, *Ocean Science*, 2019, Vol. 15, No. 1, pp. 127–146, DOI: 10.5194/os-15-127-2019.