



научный электронный журнал
ПРИНЦИПЫ ЭКОЛОГИИ

<http://ecopri.ru>

ПЕТРОЗАВОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ



<http://petrsu.ru>

Издатель

ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет»
Российская Федерация, г.Петрозаводск, пр.Ленина,33

Научный электронный журнал

ПРИНЦИПЫ ЭКОЛОГИИ

<http://ecopri.ru>

№ 4 (58). Декабрь, 2025

Главный редактор

А. В. Коросов

Редакционный совет

В. Н. Большаков
А. В. Воронин
Н. Н. Немова
Г. С. Розенберг
А. Ф. Титов
Г. С. Антипина
В. В. Вапиров
А. М. Макаров

Редакционная коллегия

Т. О. Волкова
Е. П. Иешко
В. А. Илюха
Н. М. Калинкина
J. P. Kurhinen
А. Ю. Мейгал
J. B. Jakovlev
B. Krasnov
A. Gugolek
В. Н. Якимов
А. В. Сони́на

Службы поддержки

А. Г. Марахтанов
Е. В. Голубев
С. Л. Смирнова
Н. Д. Чернышева
М. Л. Киреева

ISSN 2304-6465

Адрес редакции

185910, Республика Карелия, г.Петрозаводск, пр. Ленина, 33. Каб. 453

E-mail: ecopri@psu.karelia.ru

<http://ecopri.ru>



© ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет»



УДК 528.8

ОЦЕНКА ПЛОЩАДИ ЗАРАСТАНИЯ ГЕЛОФИТАМИ КРУПНЫХ ЗАЛИВОВ ОЗЕРА ИЛЬМЕНЬ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

ШТЕФУРЯК
Алина Викторовна

*Псковский филиал ГНЦ РФ ФГБНУ «ВНИРО» («ПсковНИРО»),
180007, Псковская область, г. Псков, ул. Максима Горького, д. 13,
a.shtefuryak@pskov.vniro.ru*

МИХАЛАП
Сергей Геннадьевич

*Псковский филиал ГНЦ РФ ФГБНУ «ВНИРО» («ПсковНИРО»),
180007, Псковская область, г. Псков, ул. Максима Горького, д. 13,
sgmikhalap@pskov.vniro.ru*

ВАСИЛЬЕВА
Елена Сергеевна

*Новгородский филиал ГНЦ РФ ФГБНУ «ВНИРО» («НовгородВНИРО»),
173002, Новгородская область, г. Великий Новгород, ул. Октябрь-
ская, д. 38, кв. 2, vasileva@novgorod.vniro.ru*

Ключевые слова:

зарастание
уровни воды
воздушно-водная
растительность
дистанционное зондирование
Земли
озеро Ильмень
NDWI
NDVI
геоинформационные системы
Landsat

Аннотация: В статье рассматриваются процессы зарастания озера Ильмень воздушно-водной растительностью – гелофитами, которая является одним из ключевых компонентов водной экосистемы и во многом определяет ее трофическое состояние и биопродуктивность. Исследование выполнено на основе дешифрирования многоспектральных спутниковых изображений с использованием нормализованного вегетационного индекса (NDVI), что позволило получить объективные сведения о распределении растительных сообществ в акватории. В качестве источника информации применялись космические снимки спутников Landsat, прошедшие стандартные этапы радиометрической и атмосферной коррекции. Особое внимание уделено трем крупным заливам озера – Аркадскому, Синецкому и Рубельскому, которые наиболее чувствительны к колебаниям уровня воды. Построенные картосхемы пространственного распределения воздушно-водной растительности позволили выявить закономерности их распространения во временном и пространственном аспектах. Установлено, что в условиях снижения уровня воды фиксируется устойчивая тенденция увеличения площади зарастания, тогда как при максимальных уровнях степень покрытия акватории растительностью не превышает 2.38–4.86 %. Наибольшие площади зарастания, превышающие 60 км², отмечены в июле 2018 г., июне 2021 г. и августе 2023 г. Для отдельных заливов определены пиковые значения зарастания, а также выявлена статистически значимая обратная зависимость между площадью зарастания и уровнем воды, аппроксимируемая полиномиальной кривой.

© Петрозаводский государственный университет

Получена: 27 июня 2025 года

Подписана к печати: 10 декабря 2025 года

Введение

Изучение процессов развития и распространения воздушно-водной растительности (ВВР) – гелофитов в пресноводных экосистемах имеет важное как теоретическое, так и прикладное значение. Зарастающие мелководья играют ключевую экологическую роль: они являются природным механизмом самоочищения водоемов, а также важным фактором формирования рыбопродуктивности (Tan et al., 2020; Громов, Кудряшов, 2022). Структура и степень зарастания позволяют не только оценивать трофический статус водоема, но и определять интенсивность процессов его сукцессии.

Озеро Ильмень является одним из крупных озер Российской Федерации, занимая 12-е место по площади водного зеркала, которая, по современным данным, составляет около 982 км². Согласно существующей гидрологической классификации Романенко, Ильмень относится к категории больших озер (площадь водного зеркала до 1000 км²). Это важный природный ресурс для региона, в т.ч. для рыбопромысловой отрасли Новгородской области. Его акватория является средой обитания более 25 видов рыб, среди которых доминируют фитофильные представители – лещ, синец, щука и судак, в совокупности формирующие около 60–70 % улова (Лукин и др., 2019). Для этих видов водная растительность обеспечивает ключевые условия для нереста, защиты и нагула молоди. Однако снижение уровня воды или ухудшение качества среды приводит к миграции рыб из этих районов (Столбунов, 2007).

Современный этап изучения площади зарастания водоемов характеризуется повышенным научным и практическим интересом, что связано в том числе с глобальными изменениями климата (Zhou et al., 2023). Известно, что пространственное распределение ВВР и динамика зарастания мелководных участков водоема зависят от гидрологического режима, и особенно от уровня воды. Зависимости «уровень воды – зарастание» для разных водоемов и разных климатических зон могут существенно различаться. Понимая, как гидрологические факторы влияют на распределение гелофитов в водоемах, можно оценивать тенденции развития ВВР.

Использование методов дистанционного зондирования земли (ДЗЗ) позволяет осуществлять мониторинг окружающей природной среды на более высоком уровне,

дополняя и даже частично заменяя прямые полевые исследования (Wang et al., 2021). Спутниковые данные могут успешно применяться для изучения биологических особенностей ВВР, а также для составления карт развития ВВР на основе данных дешифрования космических снимков. Снимки водоемов на различных временных промежутках являются ценным материалом, изучение и сопоставление которого позволяет проводить анализ современного состояния растительности, сезонных и многолетних динамических процессов и, в конечном итоге, прогнозировать и управлять ими.

Цель – проследить динамику площади зарастания ВВР крупных заливов оз. Ильмень с помощью методов ДЗЗ и выявить зависимость площади зарастания ВВР и уровня воды как определяющего фактора.

Для достижения цели нами были поставлены следующие задачи:

- выполнить классификацию спутниковых снимков;
- определить площадь зарастания ВВР;
- выявить зависимость площади зарастания ВВР крупных заливов оз. Ильмень от уровня воды.

Материалы

Многолетние данные изменения уровня воды оз. Ильмень с 2009 по 2023 г. предоставлены Новгородским филиалом ГНЦ РФ ФГБНУ «ВНИРО».

Для определения границ акватории озера, площади зарастания ВВР и картографирования использовали данные спутников Landsat 5, Landsat 8 и Landsat 9 из каталога USGS (U. S. Geological Survey) с пространственным разрешением 30 м/пиксель (Shen et al., 2022). Были выбраны преимущественно безоблачные снимки с 2009 по 2023 г. с июня по август (некоторые месяцы не представлены из-за отсутствия безоблачных снимков). Всего было проанализировано 10 спутниковых снимков. Основную обработку данных проводили в стандартных пакетах модулей географической информационной системы QGIS версии 3.28.0.

Коэффициенты множественной детерминации, уравнения регрессии для зависимости уровня воды и площадей зарастания ВВР, а также расчеты средней относительной ошибки аппроксимации вычисляли в MS Excel 2021.

Методы

За последние десятилетия проблема зарастания мелководных озер умеренной зоны получила широкое освещение в научной литературе. Показано, что пространственно-временная динамика высшей водной растительности тесно связана с изменениями гидрологического режима, прежде всего с колебаниями уровня воды и сезонным перераспределением мелководных площадей (Keddy, 2010; Søndergaard et al., 2017). Ряд исследований фиксирует увеличение площади зарастания при длительном обмелении, что связано с расширением литоральной зоны и благоприятными условиями для укореняющихся гидрофитов (Tan et al., 2020; Zhang et al., 2021). Одновременно отмечается, что при повышенных уровнях воды рост ВВР подавляется вследствие затопления прибрежной зоны и снижения освещенности донных горизонтов (Zhou et al., 2023).

Для озер умеренной части России установлено, что зарастание литорали сопровождается изменением видового состава и структурной перестройкой сообществ: камыш озерный (*Schoenoplectus lacustris*), тростник обыкновенный (*Phragmites australis*) и рдест пронзеннолистный (*Potamogeton perfoliatus*) формируют устойчивые ценозы, определяющие биотические процессы в прибрежных экотонах (Филоненко, Комарова, 2015; Кочеткова и др., 2022). Для крупных водохранилищ Волго-Балтийского каскада показано, что распространение ВВР коррелирует с сезонными и многолетними изменениями уровня, а также с эвтрофикацией, которая усиливает зарастание за счет повышенной продуктивности (Sharov, 2019; Kovaleva, Sharov, 2021).

В последние годы по оз. Ильмень и по другим мелководным системам умеренной зоны появились актуальные количественные оценки многолетней динамики гидробиологических и растительных параметров, что позволяет пересмотреть ранние представления о структуре и тенденциях зарастания. Региональные мониторинговые отчеты (данные 2003–2020 гг. и последующие годы) фиксируют существенную межгодовую вариабельность трофического состояния и площади акватории Ильменя, а также растущую роль локальных гидрологических изменений (повышение / понижение уров-

ней воды) в формировании литоральных сообществ (Поддубный и др., 2018а; Базарова, Куклин, 2023). Глобальные и региональные временные ряды высокого пространственного разрешения подтверждают, что тренды по росту или снижению площади водной растительности зависят от сочетания гидрологического режима, прозрачности воды и антропогенных факторов, это означает, что выводы о степени зарастания оз. Ильмень следует делать с учетом локальной динамики заливов и данных полевых обследований.

С учетом изменчивости видового состава растительных сообществ, формирующихся в условиях зарастания на длительных временных промежутках, а также в связи с ограничением возможностей достоверной видовой идентификации растений исключительно на основе спутниковых данных без натурной верификации, в рамках данного исследования видовой состав не рассматривался.

На подготовительном этапе проводилась радиометрическая и атмосферная коррекция исходных данных, реализуемая средствами модуля Semi-Automatic Classification Plugin (SCP) в программной среде QGIS.

В качестве границ анализа ДЗЗ использованы крупные заливы (Аркадский, Синецкий и Рубельский) оз. Ильмень при максимальном уровне воды за исследуемый период (рис. 1).

Для определения площади водного зеркала и формирования береговой линии оз. Ильмень в условиях различного уровня воды применялся расчет нормализованного разностного индекса воды (NDWI – Normalized Difference Water Index) на основе данных спутников Landsat 5, 8 и 9 (McFeeters, 1996).

С целью оценки площади зарастания крупных заливов озера ВВР выполнялась классификация изображений, основанная на вычислении нормализованного вегетационного индекса NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) для данных Landsat 5, 8 и 9. NDVI является одним из наиболее широко применяемых спектральных индексов для количественной оценки состояния растительного покрова в широком пространственно-временном масштабе (Jaskula, Sojka, 2019). Его значение прямо связано с уровнем содержания фотосинтетически активной биомассы в исследуемой области, что обеспечивает достоверную оценку пространственных параметров зарастания (Власов и др., 2019) (табл. 1).

Таблица 1. Характеристика используемых спектральных индексов

Спектральный индекс	Формула расчета	
	Landsat 5	Landsat 8–9
NDWI	$(B2-B4)/(B2+B4)$	$(B3-B5)/(B3+B5)$
NDVI	$(B4-B3)/(B4+B3)$	$(B5-B4)/(B5+B4)$

Как правило, диапазон значений NDVI колеблется от -1 до 1, где положительные значения свидетельствуют о присутствии растительной биомассы, а отрицательные указывают на наличие воды (Chebud et al., 2012). Для конкретной территории оз. Ильмень в данной работе применялись уточненные пороговые значения NDVI: значение меньше 0.11 характеризует водную поверхность, тогда как значение выше 0.11 свидетельствует о наличии растительного покрова. При этом диапазон NDVI от 0.11 до 0.32 используется для выделения зоны распространения ВВР. Классификация данных спутниковой съемки

позволила выделить три ключевых класса пикселей: открытую водную поверхность, зоны распространения полупогруженных форм высшей водной растительности и сухопутный растительный покров (см. рис. 1). При этом растения, полностью расположенные под уровнем воды, не подлежали учету в рамках проведенного дешифрирования (Бондаренко и др., 2021; Lv et al., 2020). Основным объектом для оценки служили воздушно-водные растения, характеризующиеся расположением части стебля в толще воды, а части – в воздушной среде.

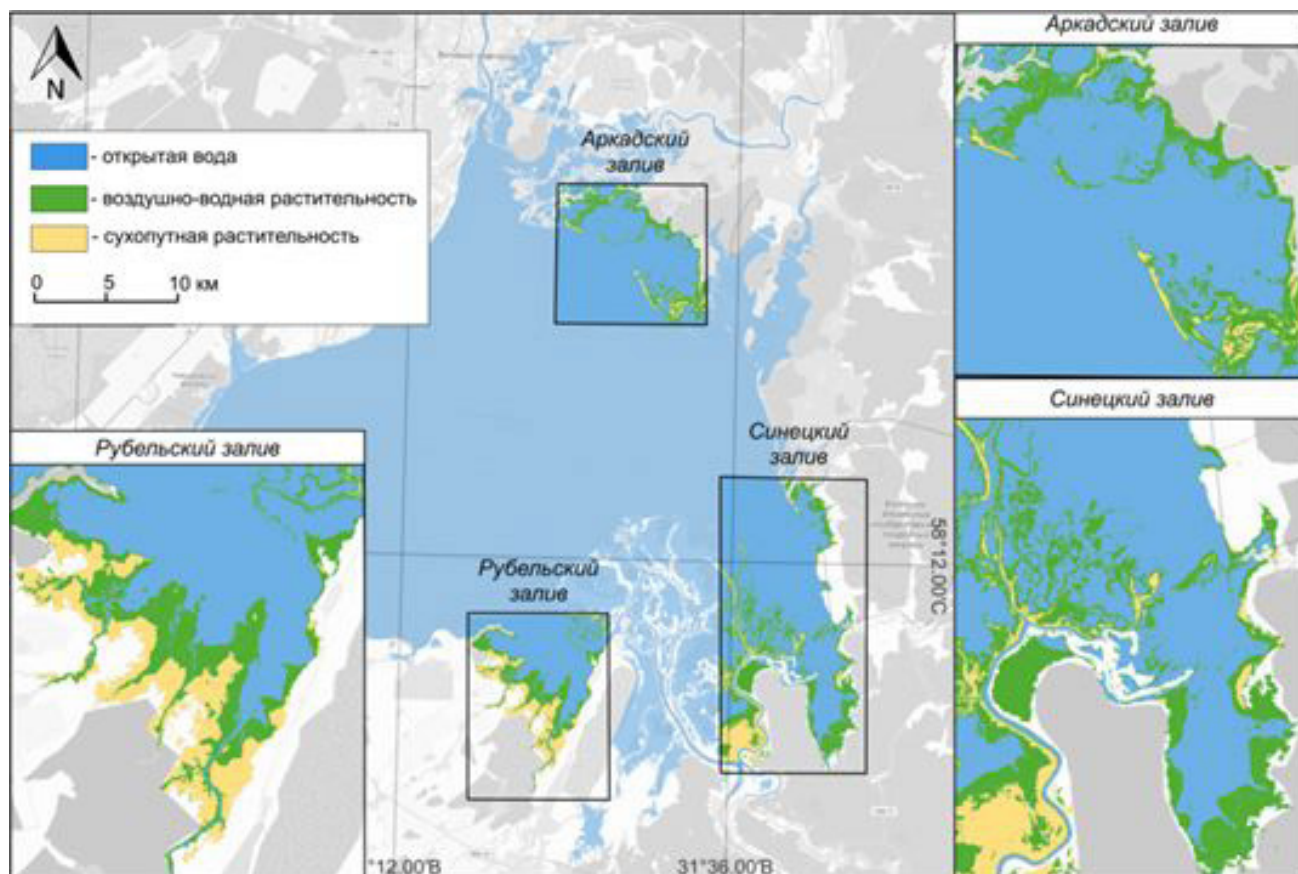


Рис. 1. Пример выделенных классов пикселей по NDVI на основе космоснимка за 23.06.2021

Fig. 1. An example of selected pixel classes according to NDVI based on a satellite image for 23.06.2021

Значение степени зарастания определяли как отношение площади зарастания к площади зеркала воды при максимальном

уровне воды и относили к определенному классу согласно методике Папченкова (Панюкова и др., 2022).

Результаты

В период с июня по август 2009–2023 гг. максимальная площадь водной поверхности оз. Ильмень достигла 1347 км², при минимальном уровне воды ее размер не

превышал 942 км². Таким образом, акватория сократилась примерно на 30 %, т. е. более чем на 400 км², что напрямую связано с межгодовыми колебаниями уровня воды в озере (рис. 2).

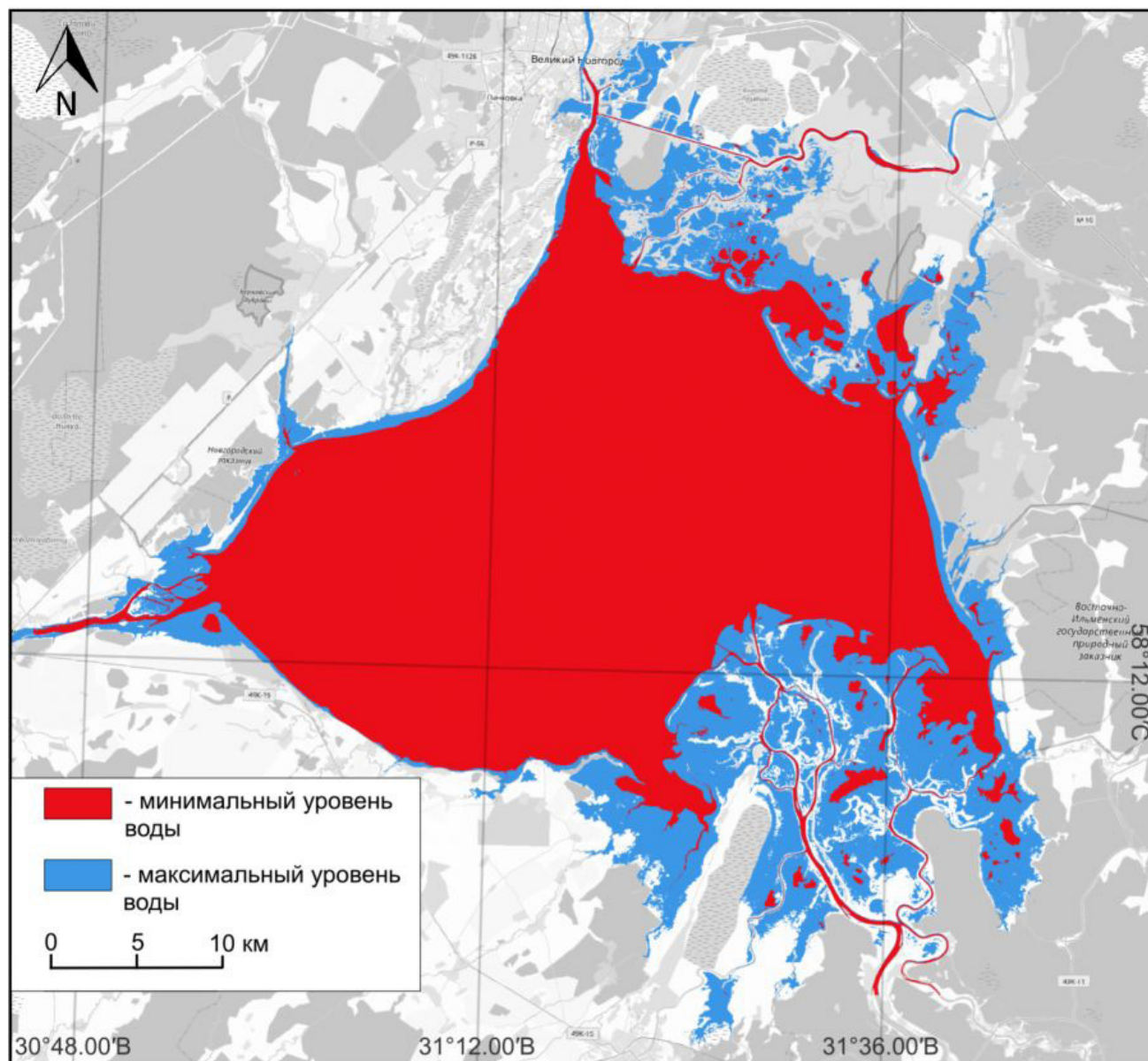


Рис. 2. Площадь акватории оз. Ильмень при разных уровнях воды
Fig. 2. The water area of Lake Ilmen at different water levels

Практический интерес представляют пространственное распределение и динамика зарастания ВВР оз. Ильмень (Кутявина и др., 2024). Анализ полученных данных свидетельствует о неравномерности зарастания озера: растительные сообщества сосредоточены преимущественно в крупных мелководных заливах – Аркадском, Синецком и Рубельском. По результатам дешифрования спутниковых изображений установлено, что при максимальной площади водного зеркала средняя степень зарастания

заливов изменялась в пределах от 2.38 до 4.86 % (см. табл. 1). Наибольшая совокупная площадь развития высшей водной растительности (более 60 км²) пришлось на июль 2018 г., июнь 2021 г. и август 2023 г. Для отдельных заливов максимальные площади зарастания составили: Аркадский – 15.75 км² (июль 2018 г.), Синецкий – 49.11 км² (август 2023 г.), Рубельский – 13.13 км² (июнь 2021 г.), что составляет около 0.97 % от его площади (табл. 2, 3).

Распределение глубин в водоеме (рис. 3) свидетельствует о преобладании мелко-водных участков, приуроченных главным образом к заливам, где глубины составляют 0–2 м. В этих зонах формируются оптимальные условия для распространения воздушно-водной растительности, тогда как более глубокие участки (2–4 м) сосредоточены в открытом плесе и ограничивают возможности зарастания. В 2019, 2021 и 2023 гг. наибольшие значения прозрачности фиксировались на станции 7, расположенной у впадения р. Ловать, что может быть связано с поступлением относительно более прозрачных речных вод и их разбавляющим эффектом. В 2020 г. наибольшая прозрачность наблюдалась в открытой части водоема (станция 6), а в 2022 г. ее уровень был сопоставим со значениями станции 8, приуроченной к Рубель-

скому заливу. В 2023 г. станция 4 (Аркадский залив) по показателям прозрачности превысила открытую часть, что, вероятно, обусловлено локальными гидродинамическими условиями и сниженной концентрацией взвешенных частиц. Такие различия отражают совокупное влияние речного стока, приносящего как растворенные вещества, так и относительно прозрачные воды (Поддубный и др., 2018б), ветрового перемешивания, усиливающего ресуспензию донных отложений в плесах (Keddy, 2010), а также пространственного распределения фитопланктона и макрофитов (Sharov, 2019). Совокупный анализ глубин и прозрачности позволяет уточнить границы и потенциальные зоны распространения ВВР, подчеркивая ключевую роль мелководных заливов.

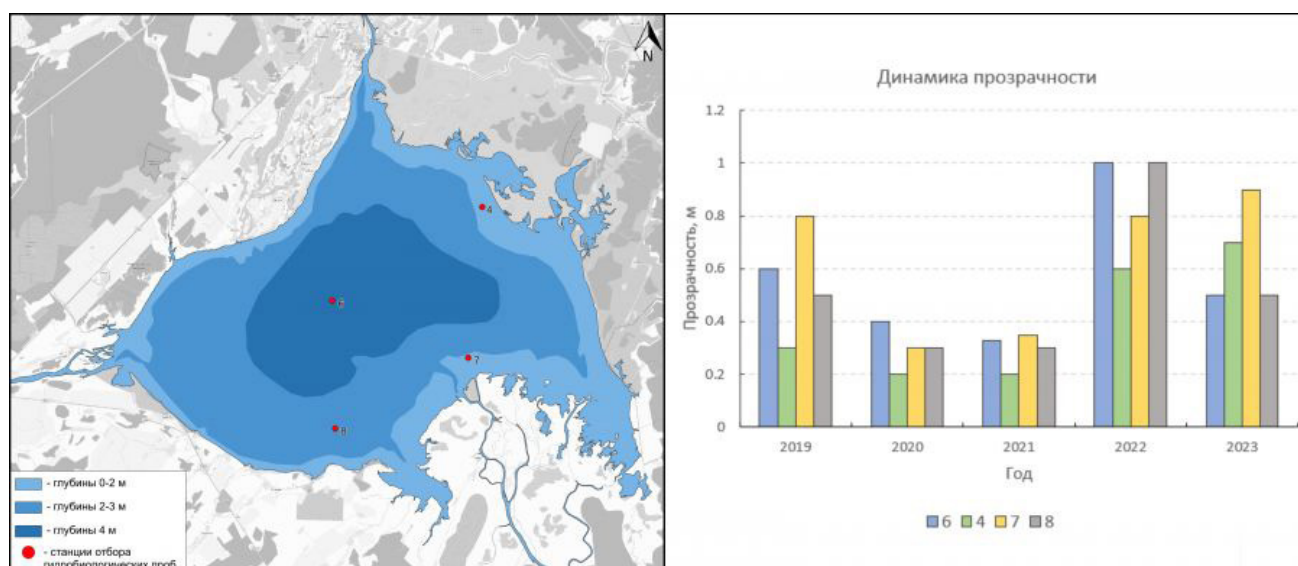


Рис. 3. Распределение глубин и динамика прозрачности воды на станциях гидробиологического мониторинга: 4, 7 и 8 – станции в заливах; 6 – станция открытого плеса

Fig. 3. Depth distribution and dynamics of water transparency at hydrobiological monitoring stations: 4, 7 and 8 – stations in bays; 6 – open-water station

В. Г. Папченков (2001) выделяет 8 классов водоемов: 1) не заросшие или почти не заросшие – площадь зарослей менее 1 % от площади акватории; 2) очень слабо заросшие – 1–5 %; 3) слабо заросшие – 6–10 %; 4) умеренно заросшие – 11–25 %; 5) значительно заросшие – 26–40 %; 6) сильно заросшие – 41–65 %; 7) очень сильно заросшие – 66–95 %; 8) сплошь заросшие – 96–100 %.

Согласно результатам дешифрирования спутниковых данных Landsat, средняя степень зарастания Аркадского и Рубельского заливов озера Ильмень в условиях максимальных уровней воды составляет менее 1 % (соответственно 0.76 % и 0.56 %), что позволяет отнести данные районы к категории

не заросших или практически не заросших. Для Синецкого залива характерно более заметное распространение ВВР – доля зарастания составляет 1 % (2.51 %), что в соответствии с классификацией свидетельствует о слабой степени его зарастания.

Зарастание заливов озера в целом характеризуется сходной структурой растительных сообществ. Центральные части акватории заняты разреженными зарослями рдеста пронзеннолистного (*Potamogeton perfoliatus*), плотность которых возрастает по мере приближения к береговой зоне. Вдоль береговой линии формируются полосы камыша озерного (*Schoenoplectus lacustris*), представленные не сплошным фронтом, а

мозаичными участками различной протяженности. Наиболее густые скопления камыша приурочены к прибрежным мелководьям и вершинам заливов, тогда как менее плотные его ценозы встречаются несколько удаленнее от берега. Между участками камыша располагаются сообщества рдеста пронзеннолистного и горца земноводного (*Persicaria amphibia*), формирующие переходные фитоценозы. Следует подчеркнуть,

что выводы о степени зарастания водоемов высшей водной растительностью на основе спутниковых индексов (например, NDVI) имеют ограниченную применимость: погруженные виды, такие как рдест пронзеннолистный, практически не детектируются данным методом, вследствие чего их пространственное распространение может быть недооценено (Распопов, 1985).

Таблица 2. Площадь зарастания ВВР крупных заливов оз. Ильмень по снимкам Landsat

Дата	Площадь зеркала воды, км ²	Уровень воды, м	Площадь зарастания ВВР при max уровне воды, км ²			Общая площадь зарастания ВВР при max уровне воды, км ²
			Аркадский залив	Синецкий залив	Рубельский залив	
Июль 2009	1001	4.36	9.83	26.04	10.37	46.24
Август 2010	966	3.09	10.07	33.28	6.26	49.61
Июнь 2011	1347	5.39	4.26	27.33	0.49	32.08
Август 2014	971	2.44	10.76	28.97	6.85	46.58
Август 2017	1206	4.8	9.16	39.47	10.89	59.52
Июль 2018	1042	3.36	15.75	38.78	10.4	64.93
Июнь 2021	1154	4.02	15.33	34.5	13.13	62.96
Август 2022	978	3.16	12.06	37.02	6.89	55.97
Июль 2023	994	2.75	5.38	23.95	4.39	33.72
Август 2023	942	5.21	10.18	49.11	6.16	65.45

Результаты анализа спутниковых данных подтверждают относительно низкую интенсивность зарастания оз. Ильмень ВВР в течение летнего периода (июнь – август) 2009–2023 гг. (Семенов, Иванова, 2023). Наименьшая совокупная площадь зарастания крупных заливов (32.08 км²) отмечена в июне 2011 г. – в условиях максимально высокого уровня воды в озере (5.39 м), что, вероятно, ограничивало условия для активного развития растительной биомассы и распространения макрофитов (табл. 3).

Динамика изменения площади зарастания носит волнообразный характер, что обусловлено значительными колебаниями уровня воды. При его снижении отмечается сокращение площади открытой воды и одновременный рост площади, занятой ВВР, в то время как при повышении уровня воды наблюдается обратный процесс (Поддубный и др., 2022). ВВР в течение 14-летнего периода сохраняется преимущественно в одних и тех же акваториях, что подчеркивает флуктуирующий характер ее пространственного развития с отчетливой положительной трендовой составляющей (рис. 4).

Многолетняя динамика площади зарастания воздушно-водной растительностью

крупных заливов оз. Ильмень имеет разные тенденции. Так, в Синецком и Рубельском заливах прослеживается отчетливая положительная тенденция в изменении площади зарастания, в то время как в Аркадском заливе этот параметр за 14-летний период остается практически неизменным (рис. 5). К примеру, в период с августа 2010 г. по август 2023 г. в Аркадском заливе рост площади зарастания составил лишь около 1.09 %, в Синецком – достиг 47.57 %, тогда как в Рубельском заливе отмечается незначительное снижение площади зарастания примерно на 1.62 % (рис. 6).

При снижении уровня воды условия для роста ВВР становятся более благоприятными: повышается степень проникновения солнечного излучения в толщу воды, усиливается прогрев мелководных участков, что способствует активному вегетативному развитию растений. При обратной ситуации, когда уровень воды поднимается, значительные площади растений оказываются затопленными или теряют доступ к необходимой для фотосинтеза солнечной энергии, что приводит к торможению роста или даже деградации растительного покрова. Понимание этой обратной зависимости между

Таблица 3. Степень зарастания ВВР крупных заливов оз. Ильмень по снимкам Landsat

Дата	Степень зарастания акватории при max уровне воды, %			Общая степень зарастания акватории при max уровне воды, %
	Аркадский залив	Синецкий залив	Рубельский залив	
Июль 2009	0.73	1.93	0.77	3.43
Август 2010	0.75	2.47	0.46	3.68
Июнь 2011	0.32	2.03	0.04	2.38
Август 2014	0.80	2.15	0.51	3.46
Август 2017	0.68	2.93	0.81	4.42
Июль 2018	1.17	2.88	0.77	4.82
Июнь 2021	1.14	2.56	0.97	4.67
Август 2022	0.90	2.75	0.51	4.16
Июль 2023	0.40	1.78	0.33	2.50
Август 2023	0.76	3.65	0.46	4.86

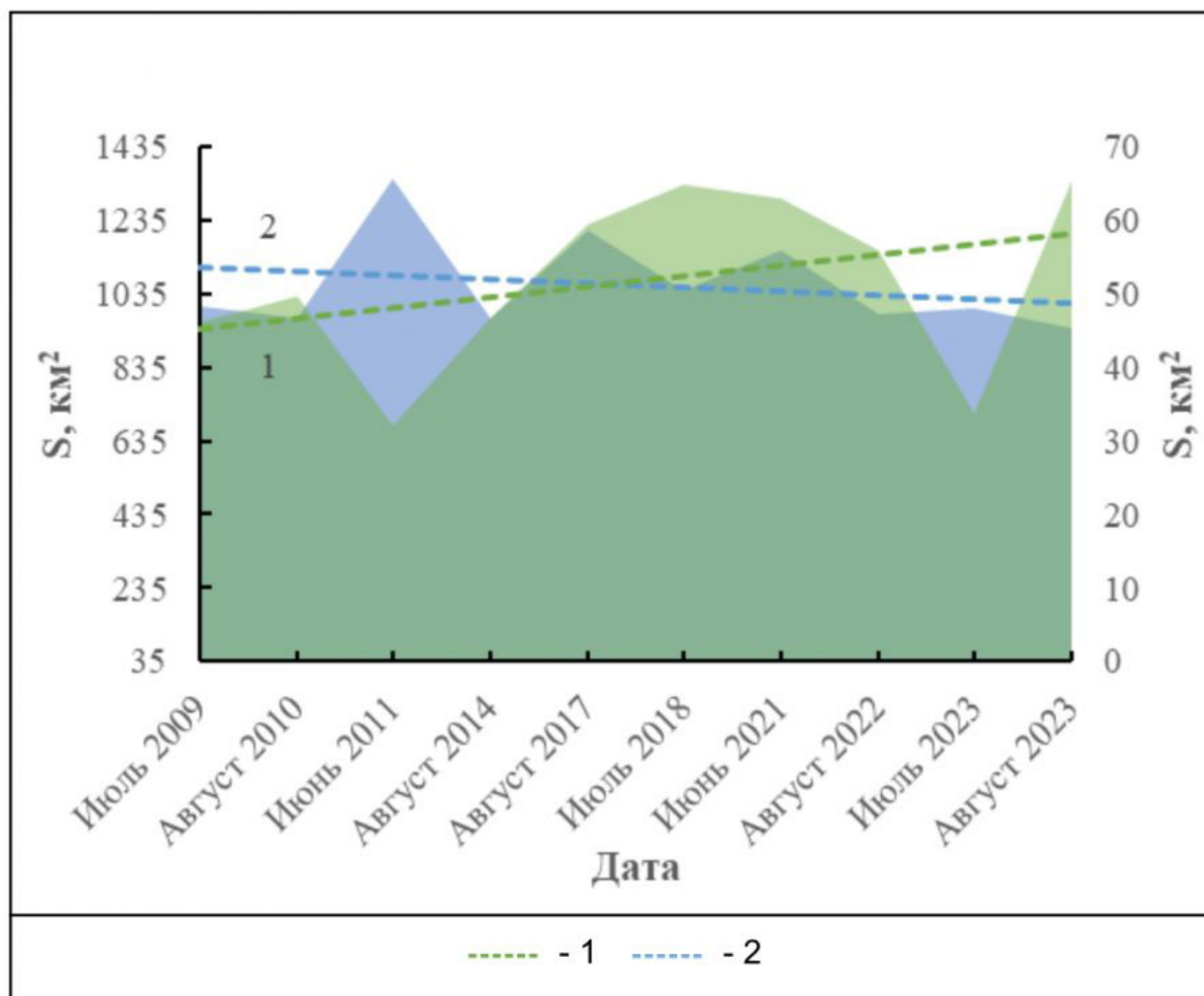


Рис. 4. Динамика площади зеркала воды и зарастания ВВР крупных заливов оз. Ильмень за 14-летний период: 1 – линия тренда площади зарастания ВВР; 2 – линия тренда площади водного зеркала

Fig. 4. Dynamics of the water mirror area and overgrowth of large bays of Lake Ilmen by aero-aquatic vegetation (AAV) over a 14-year period: 1 – trend line of the overgrowth area of AAV; 2 – trend line of the area of the water mirror

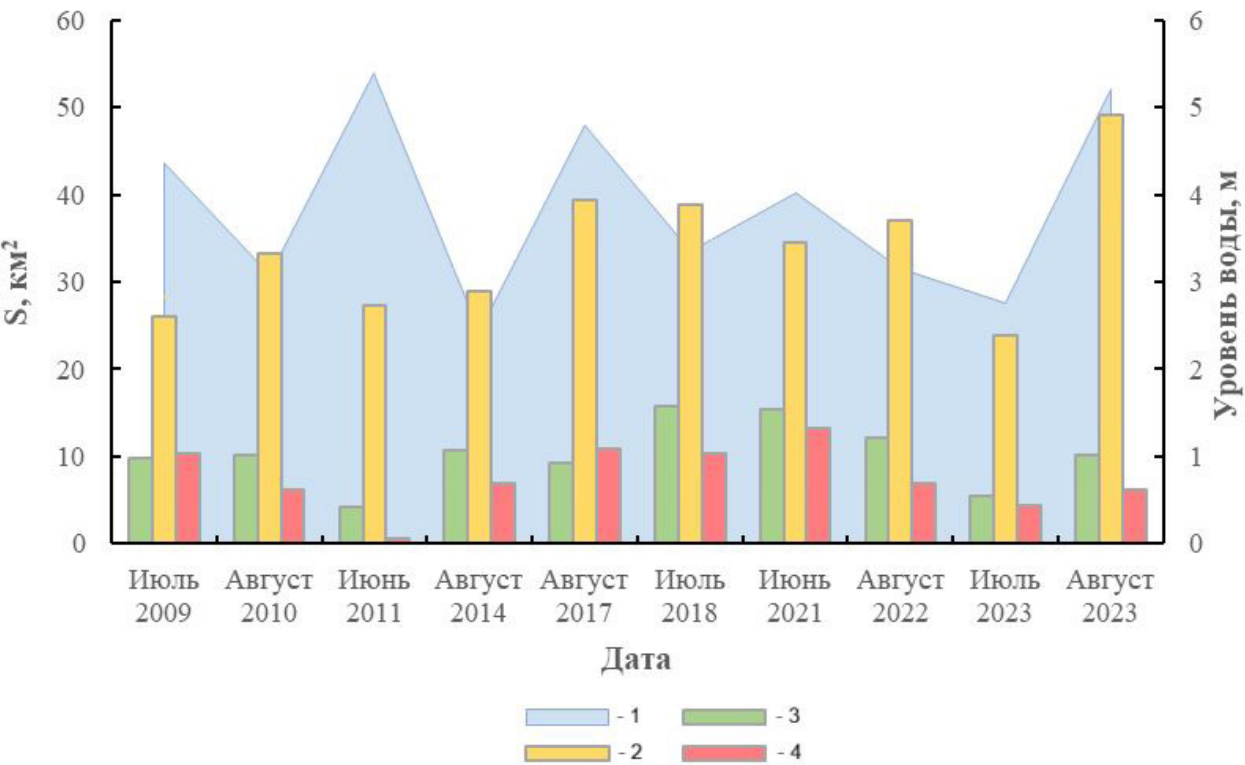


Рис. 5. Изменение уровня воды оз. Ильмень и площади зарастания ВВР в заливах: 1 – уровень воды (м); 2 – Синецкий залив; 3 – Аркадский залив; 4 – Рубельский залив
Fig. 5. Changes in the water level of Lake Ilmen and the area of overgrowth of AAV in the bays: 1 – water level (m); 2 – Sinetsky Bay; 3 – Arkadsky Bay; 4 – Rubelsky Bay

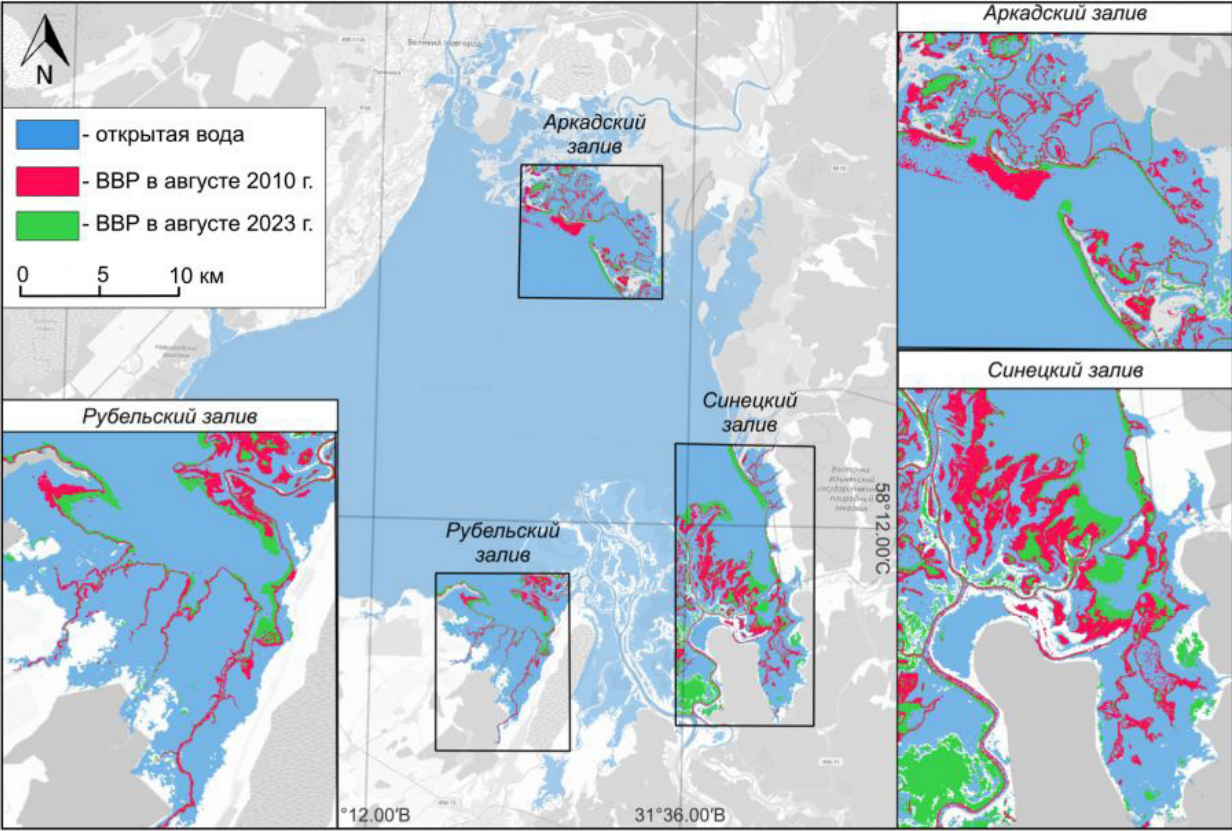


Рис. 6. Динамика зарастания крупных заливов оз. Ильмень в августе 2010 и 2023 гг.
Fig. 6. Dynamics of overgrowth of large bays of Lake Ilmen in August 2010 and 2023

уровнем воды и площадью зарастания позволяет более эффективно управлять экосистемой озера и предотвращать негативные последствия зарастания. Для многих мелководных озер Северо-Запада России степень развития ВВР прямо определяется сезонной изменчивостью гидрологического режима, а пространственные характеристики этой зоны позволяют оценивать условия для нереста ряда фитофильных рыб (Филоненко, Комарова, 2015; Kovaleva, Sharov, 2021).

Расчеты коэффициентов корреляции Пир-

сона ($R = 0.44$; $p > 0.05$) и ранговой корреляции Спирмена ($R = 0.4$; $p > 0.05$) между площадью водного зеркала, которая обуславливает границы распространения, и площадью зарастания озера ВВР, несмотря на положительные тенденции, не выявили статистически достоверных связей.

Попытка смоделировать зависимость площади зарастания озера ВВР от площади водного зеркала при помощи методов линейной регрессии не выявила серьезной зависимости ($R^2 = 0.19$; $p > 0.05$) (рис. 7).

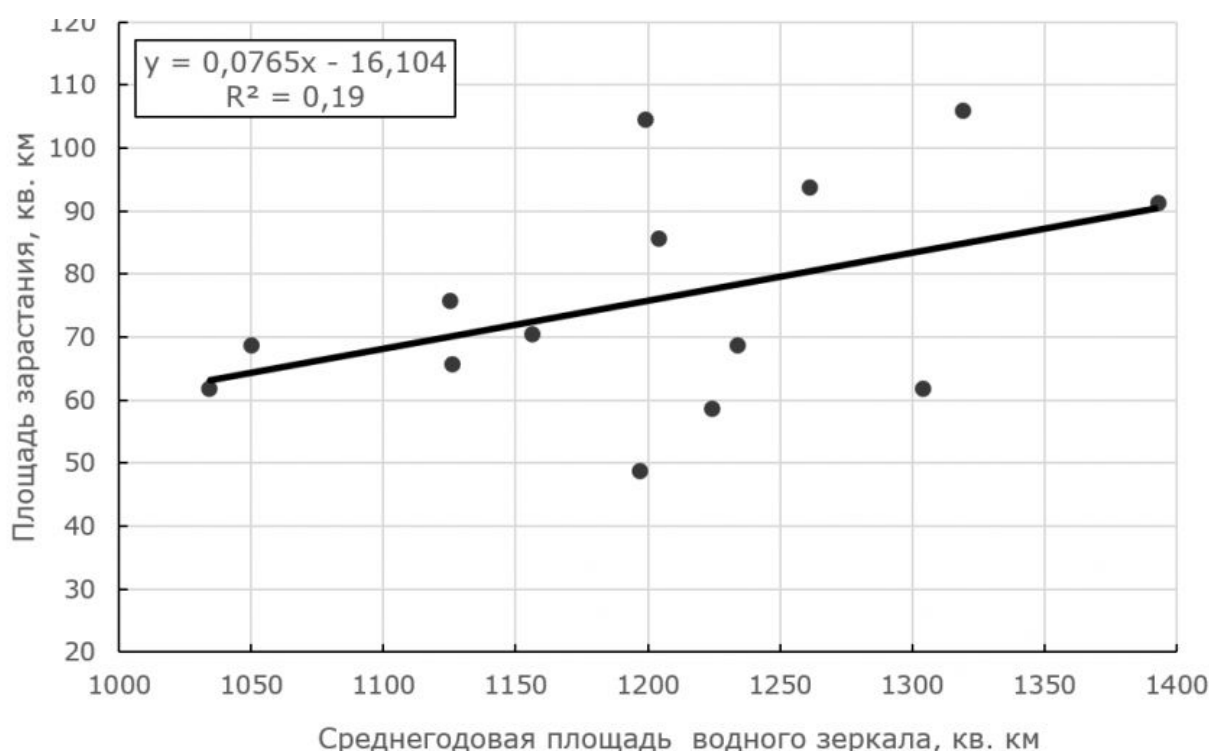


Рис. 7. Зависимость площади зарастания ВВР от среднегодовой площади водного зеркала оз. Ильмень по итогам линейного регрессионного анализа

Fig. 7. Dependence of the overgrowth area of the aero-aquatic vegetation (AAV) on the average annual area of the water mirror of Lake Ilmen according to the results of linear regression analysis

Все это свидетельствует о достаточно слабой прямой зависимости площади зарастания оз. Ильмень в целом и рассмотренных в работе заливов от уровня воды или площади водного зеркала озера, что нехарактерно для других крупных пресноводных водоемов, поскольку в годы с низким уровнем воды увеличивается площадь мелководной литоральной зоны, которая интенсивно зарастает полупогруженными макрофитами (Михайлова, Михалап, 2021).

Вместе с тем отсутствие очевидной связи степени зарастания с уровнем воды и площадью водного зеркала можно объяснить особенностями рельефа озерной котловины, а именно мелководностью и пологим

профилем его береговой зоны. По данным М. А. Науменко с соавторами, уклоны котловины дна озера крайне малы ($<0.025^\circ$), что делает его дно практически плоским (Науменко и др., 2015). По этой причине его центральный плес не способен к аккумуляции значительных объемов воды. Данные особенности позволяют озеру в течение года изменять площадь водного зеркала почти на 1000 квадратных километров, а наличие большого количества заболоченных островов и аванделът, выносящих большое количество отложений, в т. ч. богатых азотом и фосфором, создает благоприятные условия для развития ВВР.

Глубины в рассмотренных нами Аркадском, Рубельском и Синецком заливах редко превышает 1–2-метровую отметку, а именно на такой глубине создаются оптимальные условия для развития ВВР, в частности камыша озерного, который является доминирующим видом воздушно-водных растений оз. Ильмень. При низком уровне воды в озере создаются более благоприятные условия для роста ВВР в «центр» акватории заливов, в то время как при высоком уровне воды в результате подтопления пологих берегов и заболоченных островов также создаются благоприятные условия для зарастания, но уже в направлении периферии акватории.

Таким образом, вероятнее всего, в динамике процессов зарастания оз. Ильмень существует определенный диапазон перехода к разным сценариям процесса зарастания, который, по нашим наблюдениям, соответствует уровню воды в диапазоне 2.5–3.5 метра или площади водного зеркала от 900 до 1000 квадратных километров.

При этом следует учесть, что даже при одном и том же уровне воды и площади водного зеркала разные участки озера, в силу ветровой экспозиции, седиментации осадков, глубины и скорости течения впадающих в озеро рек и других факторов, могут быть в разной степени пригодны для зарастания ВВР.

Заключение

Полученные с помощью спутниковых снимков результаты за период с июня по август с 2009 по 2023 г., выявили флуктуирующий характер зарастания ВВР оз. Ильмень с выраженной положительной тенденцией. Отмечено, что средняя степень зарастания Аркадского и Рубельского заливов озера при максимальном уровне воды за исследуемый период составляет менее 1 % (0.76 % и 0.56 % соответственно), что классифицирует данные участки как не заросшие или почти не заросшие. Площадь зарослей в Синецком заливе превышает 1 % (2.51 %) от площади

акватории озера, что характеризует его как слабо заросший.

Наибольшая общая площадь развития ВВР на озере была отмечена в июле 2018 г., июне 2021 г. и августе 2023 г., когда она несколько превышала 60 км². В Аркадском и Синецком заливах максимальные площади зарастания (15.75 и 49.11 км²) наблюдались в июле 2018 г. и августе 2023 г. соответственно. В Рубельском заливе максимальная площадь, покрытая ВВР, отмечена в июне 2021 г. и составила 13.13 км², или 0.97 %, за исследуемый период. Минимальная общая площадь зарастания ВВР крупных заливов наблюдалась в июне 2011 г., что было связано с высоким уровнем воды (5.39 м).

Нам не удалось выявить прямой зависимости площади зарастания оз. Ильмень и некоторых его заливов от уровня воды и площади водного зеркала озера, однако сложная динамика процессов зарастания водоема обусловлена рельефными особенностями озерной котловины и прилегающей к ней территории, которые обуславливают разнонаправленность процессов зарастания в годы с высоким и низким уровнями воды.

Использование спутниковых снимков позволяет проследить за многолетней динамикой зарастания ВВР крупных мелководных заливов оз. Ильмень. Определения площади и степени зарастания с помощью классификации на основе рассчитанного индекса NDVI могут быть использованы при проведении аналогичных исследований внутренних водоемов, а также в гидробиологических исследованиях.

Таким образом, проведенный анализ подтверждает, что оз. Ильмень как экосистема является неоднородной и состоит из плесов с отличающимися комплексами экологических факторов. Реакция воздушно-водных макрофитов в значительной степени зависит от ландшафтно-гидрологических особенностей каждого плеса, что и выражается в неоднородности идущих в водоеме процессов зарастания.

Библиография

- Базарова Б. Б., Куклин А. П. Динамика биомассы и площади зарастания водной растительности озера Кенон (Забайкальский край) в условиях снижения уровня воды // Принципы экологии. 2023. № 2. С. 30–41. DOI: 10.15393/j1.art.2023.13724
- Бондаренко Л. Г., Кульба С. Н., Петрашов В. И., Смирнов С. С., Матвеева Е. И., Рудакова Н. А. Оценка зарастания водной растительностью Челбасской группы азовских лиманов // Водные биоресурсы и среда обитания. 2021. Т. 4, № 4. С. 14–26. DOI: 10.47921/2619-1024_2021_4_4_14
- Власов Б. П., Грищенко Н. Д., Сивенков А. Ю., Суховило Н. Ю., Колбун Д. А. Оценка современного состояния и динамики зарастания озер Национального парка «Нарочанский» с использованием данных дистанционного зондирования Земли // Acta Geographica Silesiana.

2019. Т. 13, № 4 (36). С. 39–55.
- Громов С. А., Кудряшов Н. А. Оценка зарастания водоемов в условиях антропогенной нагрузки с применением спутниковых данных // Экология и промышленность России. 2022. № 10. С. 28–34.
- Кочеткова А. И., Брызгалина Е. С., Филиппов О. В., Баранова М. С. Динамика зарастания Волгоградского водохранилища (1972–2018 гг.) // Принципы экологии. 2022. № 1. С. 68–73. DOI: 10.15393/j1.art.2022.10002
- Кутявина Т. И., Рутман В. В., Ашихмина Т. Я. Оценка динамики зарастания высшими водными растениями акватории эвтрофного водохранилища с использованием спутниковых изображений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21, № 1. С. 299–307. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-1-299-307
- Лукин А. А., Никитина Т. В., Лукина Ю. Н., Тыркин И. А. Состояние рыбной части сообщества озера Ильмень в условиях интенсивной промысловой нагрузки // Вопросы рыболовства. 2019. Т. 20, № 1. С. 23–32.
- Науменко М. А., Каретников С. Г., Гузиватый В. В., Крючков А. М., Поздняков Ш. Р. Озеро Ильмень: Определение морфометрических характеристик на основе цифровой модели // Водные ресурсы. 2015. Т. 42, № 5. С. 467. DOI: 10.7868/S0321059615050120
- Панюкова Е. В., Тетерюк Б. Ю., Панюков А. А. Характеристика и продуктивность сообществ гидрофитов малых водохранилищ Европейского Северо-Востока России // Russian Journal of Ecosystem Ecology. 2022. Т. 7, № 1. С. 22–32. DOI: 10.21685/2500-0578-2022-1-3
- Папченков В. Г. Растительный покров водоемов и водотоков Среднего Поволжья. Ярославль: ЦМП МУБИНТ, 2001. 214 с.
- Поддубный С. А., Чемерис Е. В., Бобров А. А. Влияние режима уровня воды на зарастание мелководий Рыбинского водохранилища (обзор) // Биология внутренних вод. 2018а. № 4. С. 38–46. DOI: 10.1134/S0320965218030142
- Поддубный С. Г., Чемерис Е. В., Бобров Д. А. Гидрологические факторы формирования растительности озера Ильмень // Вестник СПбГУ. Науки о Земле. 2018б. Т. 63, № 4. С. 377–390.
- Поддубный С. А., Чемерис Е. В., Кутузов А. В., Цветков А. И., Бобров А. А. Динамика высшей водной растительности защищенного мелководья в связи с уровнем воды в Волжском плесе Рыбинского водохранилища // Биология внутренних вод. 2022. № 2. С. 136–146. DOI: 10.31857/S0320965222020085
- Распопов И. М. Высшая водная растительность больших озер Северо-Запада СССР. Л.: Наука, 1985. 198 с.
- Семенов А. А., Иванова Л. П. Геоинформационное картографирование зарастания прибрежной зоны озер Архангельской области // Вестник Северного (Арктического) федерального университета. Серия: Науки о Земле. 2023. № 1. С. 23–32.
- Столбунов И. А. Особенности распределения молоди рыб в прибрежной зоне Рыбинского водохранилища // РАН. Биология внутренних вод. 2007. № 4. С. 55–61.
- Филоненко И. В., Комарова А. С. Многолетняя динамика площади зарастания прибрежно-водной растительностью оз. Воже // Принципы экологии. 2015. № 4 (16). С. 63–72.
- Chebud Y., Ghinwa M. Naja, Rosanna G. Rivero, Assefa M. Melesse. Water Quality Monitoring Using Remote Sensing and an Artificial Neural Network // Water Air Soil Pollut. 2012. Vol. 223. P. 4875–4887. DOI: 10.1007/s11270-012-1243-0
- Jaskula J., Sojka M. Assessing Spectral Indices for Detecting Vegetative Overgrowth of Reservoirs // Polish Journal of Environmental Studies. 2019. Vol. 28, No 6. P. 4199–4211. DOI: 10.15244/pjoes/98994
- Keddy P. A. Wetland Ecology: Principles and Conservation. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2010. 497 p.
- Kovaleva N. O., Sharov A. I. Dynamics of Aquatic Plant Communities in lakes of the North-West of Russia under climate change // Limnology and Freshwater Biology. 2021. No 4. P. 852–854.
- Lv W., Liu Y., Zhang J. A framework for mapping aquatic vegetation in shallow lakes using Sentinel-2 time series and random forest classification // Ecological Indicators. 2020. Vol. 117. P. 106687.
- McFeeters S. K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features // International Journal of Remote Sensing. 1996. Vol. 17, No 7. P. 1425–1432.
- Sharov A. I. Dynamics of aquatic plant communities in lakes of the North-West of Russia under climate change // Limnology and Freshwater Biology. 2019. No 4. P. 852–854. DOI: 10.31951/2658-3518-2019-A-4-852
- Shen L., Li J., Chen X. Monitoring aquatic vegetation dynamics using multi-temporal Sentinel-2 imagery: A Case Study in Lake Taihu, China // Remote Sensing. 2022. Vol. 14, No 5. P. 1103.
- Søndergaard M., Lauridsen T., Johansson L. Submerged macrophytes as indicators of lake ecological status // Ecological Indicators. 2017. Vol. 82. P. 1–8.
- Tan X., Zhang Y., Liu C. Remote sensing of aquatic vegetation dynamics in shallow lakes // Remote Sensing of Environment. 2020. Vol. 247. P. 111–941.

- Wang X., Liu X., Yang X. Evaluating vegetation succession in shallow lakes using multi-sensor remote sensing data // *Science of the Total Environment*. 2021. Vol. 782. P. 146876. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.146876
- Zhang Y., Wang Y., Li X. Water level fluctuations and aquatic vegetation succession in temperate lakes // *Hydrobiologia*. 2021. Vol. 848. P. 1053–1067.
- Zhou Y., Fang J., Wang W. Vegetation–hydrology interaction in floodplain lakes: insights from 20-year satellite observations // *Hydrology and Earth System Sciences*. 2023. Vol. 27, No 4. P. 1223–1241. DOI: 10.5194/hess-27-1223-2023

ESTIMATION OF THE AREA OVERGROWN WITH HELOPHYTES IN LARGE BAYS OF LAKE ILMEN USING EARTH REMOTE SENSING DATA

SHTEFURYAK
Alina Victorovna

Pskov Branch of the State Scientific Center of the RF VNIRO Federal State Budgetary Scientific Institution (PskovNIRO), 180007 Russia Pskov region Pskov Maxim Gorky st., 13, a.shtefuryak@pskov.vniro.ru

MIKHALAP
Sergey Gennadyevich

Pskov Branch of the State scientific Center of the RF VNIRO Federal State Budgetary Scientific Institution (PskovNIRO), 180007 Russia Pskov region Pskov Maxim Gorky st., 13, sgmikhlap@pskov.vniro.ru

VASILYEVA
Elena Sergeevna

Novgorod Branch of the State Scientific Center of the Russian Federation VNIRO Federal State Budgetary Scientific Institution (NovgorodVNIRO), 38 Oktyabrskaya str., sq. 2, Veliky Novgorod, 173002, Novgorod region, vasileva@novgorod.vniro.ru

Key words:

overgrowth
water levels
aero-aquatic vegetation
remote sensing of the Earth
Lake Ilmen
NDWI
NDVI
geographical information systems
Landsat

Summary:

The article considers the processes of overgrowth of Lake Ilmen with airborne aquatic vegetation – helophytes. This vegetation is one of the key components of the aquatic ecosystem, and largely determines its trophic state and bioproductivity. The study was performed based on the decoding of multispectral satellite images using the normalized vegetation index (NDVI). This allowed us to obtain objective information about the distribution of plant communities in the water area. The satellite images of Landsat satellites that passed the standard stages of radiometric and atmospheric correction were used as a source of information. Special attention was paid to three large bays of the lake – Arkadsky, Sinetsky and Rubelsky, which are most sensitive to fluctuations in water level. The constructed map charts of the spatial distribution of aerial and aquatic vegetation made it possible to identify patterns of their distribution in temporal and spatial aspects. It was established that under conditions of decreasing water levels, a steady tendency to increase the area of overgrowth is recorded, whereas at maximum levels, the degree of vegetation coverage does not exceed 2.38–4.86 %. The largest areas of overgrowth, exceeding 60 km², were recorded in July 2018, June 2021 and August 2023. For individual bays, peak values of overgrowth were determined. A statistically significant inverse relationship was also found between the overgrown area and the water level approximated by a polynomial curve,.

Received on: 27 June 2025

Published on: 10 December 2025

References

- Bazarova B. B. Kuklin A. P. Dynamics of biomass and overgrowth area of aquatic vegetation of Kenon Lake (Trans-Baikal Territory) under conditions of decreasing water level, Principy ekologii. 2023. No. 2. P. 30–41. DOI: 10.15393/j1.art.2023.13724
- Bondarenko L. G. Kul'ba S. N. Petrashov V. I. Smirnov S. S. Matveeva E. I. Rudakova N. A. Assessment of overgrowth by aquatic vegetation of the Chelbassky group of the Azov estuaries, Vodnye bioresursy i sreda obitaniya. 2021. T. 4, No. 4. P. 14–26. DOI: 10.47921/2619-1024_2021_4_4_14
- Chebud Y., Ghinwa M. Naja, Rosanna G. Rivero, Assefa M. Melesse. Water Quality Monitoring Using Remote Sensing and an Artificial Neural Network, Water Air Soil Pollut. 2012. Vol. 223. P. 4875–4887. DOI: 10.1007/s11270-012-1243-0
- Filonenko I. V. Komarova A. S. Long-term dynamics of the area overgrown with coastal and aquatic vegetation of Lke Vozhe, Principy ekologii. 2015. No. 4 (16). P. 63–72.
- Gromov S. A. Kudryashov N. A. Assessment of reservoir overgrowth under anthropogenic stress using

- satellite data, *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*. 2022. No. 10. P. 28–34.
- Jaskula J., Sojka M. Assessing Spectral Indices for Detecting Vegetative Overgrowth of Reservoirs, *Polish Journal of Environmental Studies*. 2019. Vol. 28, No 6. P. 4199–4211. DOI: 10.15244/pjoes/98994
- Keddy P. A. *Wetland Ecology: Principles and Conservation*. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2010. 497 p.
- Kochetkova A. I. Bryzgalina E. S. Filippov O. V. Baranova M. S. Dynamics of overgrowth of the Volgograd reservoir (1972–2018), *Principy ekologii*. 2022. No. 1. P. 68–73. DOI: 10.15393/j1.art.2022.10002
- Kovaleva N. O., Sharov A. I. Dynamics of Aquatic Plant Communities in lakes of the North-West of Russia under climate change, *Limnology and Freshwater Biology*. 2021. No 4. P. 852–854.
- Kutyavina T. I. Rutman V. V. Ashihmina T. Ya. Assessment of the dynamics of overgrowth by higher aquatic plants in the water area of a eutrophic reservoir using satellite images, *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2024. T. 21, No. 1. P. 299–307. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-1-299-307
- Lukin A. A. Nikitina T. V. Lukina Yu. N. Tyrkin I. A. The state of the fishing part of the Lake Ilmen community under conditions of intense fishing load, *Voprosy rybolovstva*. 2019. T. 20, No. 1. P. 23–32.
- Lv W., Liu Y., Zhang J. A framework for mapping aquatic vegetation in shallow lakes using Sentinel-2 time series and random forest classification, *Ecological Indicators*. 2020. Vol. 117. P. 106687.
- McFeeters S. K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features, *International Journal of Remote Sensing*. 1996. Vol. 17, No 7. P. 1425–1432.
- Naumenko M. A. Karetnikov S. G. Guziatyy V. V. Kryuchkov A. M. Pozdnyakov Sh. R. Lake Ilmen: Determination of morphometric characteristics based on a digital model, *Vodnye resursy*. 2015. T. 42, No. 5. P. 467. DOI: 10.7868/S0321059615050120
- Panyukova E. V. Teteryuk B. Yu. Panyukov A. A. Characteristics and productivity of hydrophyte communities in small reservoirs of the European Northeast of Russia, *Russian Journal of Ecosystem Ecology*. 2022. T. 7, No. 1. P. 22–32. DOI: 10.21685/2500-0578-2022-1-3
- Papchenkov V. G. *Vegetation cover of reservoirs and watercourses of the Middle Volga region*. Yaroslavl': CMP MUBiNT, 2001. 214 p.
- Poddubnyy S. A. Chemeris E. V. Bobrov A. A. The influence of the water level regime on the overgrowth of the shallow waters of the Rybinsk reservoir (review), *Biologiya vnutrennih vod*. 2018a. No. 4. P. 38–46. DOI: 10.1134/S0320965218030142
- Poddubnyy S. A. Chemeris E. V. Kutuzov A. V. Cvetkov A. I. Bobrov A. A. Dynamics of higher aquatic vegetation in protected shallow waters in connection with the water level in the Volga reach of the Rybinsk reservoir, *Biologiya vnutrennih vod*. 2022. No. 2. P. 136–146. DOI: 10.31857/S0320965222020085
- Poddubnyy S. G. Chemeris E. V. Bobrov D. A. Hydrological factors of vegetation formation in Lake Ilmen, *Vestnik SPbGU. Nauki o Zemle*. 2018b. T. 63, No. 4. P. 377–390.
- Raspopov I. M. *Higher aquatic vegetation of the large lakes of the North-West of the USSR*. L.: Nauka, 1985. 198 p.
- Søndergaard M., Lauridsen T., Johansson L. Submerged macrophytes as indicators of lake ecological status, *Ecological Indicators*. 2017. Vol. 82. P. 1–8.
- Semenov A. A. Ivanova L. P. Geoinformation mapping of the overgrowth of the coastal zone of the lakes of the Arkhangelsk region, *Vestnik Severnogo (Arkticheskogo) federal'nogo universiteta. Seriya: Nauki o Zemle*. 2023. No. 1. P. 23–32.
- Sharov A. I. Dynamics of aquatic plant communities in lakes of the North-West of Russia under climate change, *Limnology and Freshwater Biology*. 2019. No 4. P. 852–854. DOI: 10.31951/2658-3518-2019-A-4-852
- Shen L., Li J., Chen X. Monitoring aquatic vegetation dynamics using multi-temporal Sentinel-2 imagery: A Case Study in Lake Taihu, China, *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14, No 5. P. 1103.
- Stolbunov I. A. Peculiarities of distribution of juvenile fish in the coastal zone of the Rybinsk reservoir, *RAN. Biologiya vnutrennih vod*. 2007. No. 4. P. 55–61.
- Tan X., Zhang Y., Liu C. Remote sensing of aquatic vegetation dynamics in shallow lakes, *Remote Sensing of Environment*. 2020. Vol. 247. P. 111–941.
- Vlasov B. P. Grischenkova N. D. Sivenkov A. Yu. Suhovilo N. Yu. Kolbun D. A. Assessment of the current state and dynamics of lake overgrowth in Narochansky National Park using Earth remote sensing data, *Acta Geographica Silesiana*. 2019. T. 13, No. 4 (36). P. 39–55.
- Wang X., Liu X., Yang X. Evaluating vegetation succession in shallow lakes using multi-sensor remote sensing data, *Science of the Total Environment*. 2021. Vol. 782. P. 146876. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.146876
- Zhang Y., Wang Y., Li X. Water level fluctuations and aquatic vegetation succession in temperate lakes, *Hydrobiologia*. 2021. Vol. 848. P. 1053–1067.
- Zhou Y., Fang J., Wang W. Vegetation–hydrology interaction in floodplain lakes: insights from 20-year satellite observations, *Hydrology and Earth System Sciences*. 2023. Vol. 27, No 4. P. 1223–1241. DOI: 10.5194/hess-27-1223-2023