

Оценка динамики зарастания высшими водными растениями акватории эвтрофного водохранилища с использованием спутниковых изображений

Т. И. Кутявина¹, В. В. Рутман¹, Т. Я. Ашихмина^{1,2}

¹ *Вятский государственный университет, Киров, 610000, Россия*
E-mail: kutyavinati@gmail.com

² *Институт биологии Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, 167982, Россия*
E-mail: ecolab2@gmail.com

Изучение высшей водной растительности имеет важное экологическое и рыбохозяйственное значение. Сообщества водных растений создают органическое вещество, которое служит основой питания животного населения водных объектов, являются экологической нишей для развития и размножения гидробионтов. В то же время высшие водные растения — это информативные индикаторы состояния водной среды, по видовому составу и уровню развития которых можно оценить степень воздействия природных и антропогенных факторов. Цель работы — выявить доминирующие виды высших водных растений и их распространение по акватории эвтрофного водохранилища за 7-летний период, а также с помощью данных дистанционного зондирования Земли оценить площадь зарастания водоёма. Видовой состав водных растений определён во время летних маршрутных наблюдений на Белохолуницком вдхр. Кировской обл. в 2016–2022 гг. Границы водоёма и заросли высших водных растений на акватории выделены на разновременных космических снимках со спутника Sentinel-2 по результатам расчёта вегетационных индексов: нормализованного разностного водного индекса (*англ.* Normalized Difference Water Index — NDWI), нормализованного разностного вегетационного индекса (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index — NDVI) и индекса растительности с поправкой на воду (*англ.* Water Adjusted Vegetation Index — WAVI). Площади зарастания водными растениями рассчитывали в программном продукте QGIS Desktop 3.26.3. Выделено восемь доминирующих видов водных растений, образующих крупные заросли на объекте исследования. Максимальные площади зарастания отмечены в верховье и вдоль правого берега водохранилища на глубинах от 0 до 2 м. Площадь зарастания водной растительностью в водохранилище в разные годы менялась в диапазоне от 12 до 24 %. Изменение площади зарастания связано с колебанием уровня режима водохранилища. Результаты изучения высшей водной растительности Белохолуницкого вдхр. могут использоваться как основа для проведения гидробиологических исследований и анализа рыбохозяйственной ценности водоёма.

Ключевые слова: водохранилище, высшие водные растения, Sentinel-2, вегетационные индексы

Одобрена к печати: 15.01.2024
DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-1-299-307

Введение

Прибрежно-водные и водные растения играют важную роль в системе водного биоценоза. Высшие водные растения (ВВР), наряду с фитопланктоном, создают первичную продукцию в водных объектах, от которой зависят состав и продуктивность ихтиофауны и жизнь всего животного населения водоёмов в целом (Мартыненко, Мержвинский, 2011). Заросли водных растений являются экологической нишей для развития комплекса планктонных, фитофильных и бентосных животных, а также местами размножения, кормления и защиты множества видов беспозвоночных, рыб, водоплавающих птиц и водных млекопитающих. Видовое разнообразие животных в зарослях водных растений значительно выше, чем в открытой части водоёма; велика численность и биомасса планктонных и бентосных организмов. Растения становятся поверхностью для развития перифитона; кроме того, они связаны между собой трофическими и метаболическими взаимоотношениями. Водные растения определяют газовый состав воды, что оказывает непосредственное влияние на многие группы животных.

В зарослях ВВР многие виды рыб (лещ, сазан, окунь, щука, карась золотой, карась серебряный, вобла, язь, плотва, верховка, уклейка, белоглазка, густера, линь, вьюн, голец, щиповка, ротан и др.) мечут икру. Здесь же происходит нагул молоди и взрослых рыб, которые питаются различными беспозвоночными и водорослями, обитающими в зарослях ВВР, а также находят укрытия от хищников (Садчиков, Кудряшов, 2004). Сообщества ВВР могут служить биофильтрами для растворённых и взвешенных загрязняющих веществ, поступающих с прибрежных территорий. Кроме этого, ВВР — информативные индикаторы состояния водной среды. По видовому составу растений, степени развития их сообществ, их продуктивности можно оценивать степень воздействия природных и антропогенных факторов. В связи с этим изучение прибрежно-водных и водных растений имеет очень большое теоретическое и практическое значение.

Цель работы — выявить доминирующие виды высших водных растений и их распространение по акватории эвтрофного водохранилища за 7-летний период, а также с помощью данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) оценить площадь зарастания водоёма.

Объект, материалы и методы исследования

Исследования проведены на территории Кировской обл. — одной из крупнейших в Нечернозёмной зоне Российской Федерации по площади. Данный регион расположен на северо-востоке Русской равнины в центрально-восточной части Европейской России. В Кировской обл. насчитывается около 20 тыс. рек общей протяжённостью 66,65 тыс. км. Количество замкнутых водоёмов региона (озёр, прудов, водохранилищ) составляет 5,5 тыс., при этом самые крупные из них сосредоточены в северной заболоченной части Кировской обл.

Для исследования был выбран крупнейший водоём региона — Белохолуницкое вдхр. Площадь зеркала водохранилища составляет 17,4 км², полный статический объём — 51 млн м³ (Водохозяйственный..., 1981). На берегах водохранилища находятся несколько небольших населённых пунктов и садоводческие участки, вдоль его северной стороны проходит федеральная автомобильная трасса.

Подспутниковые наблюдения на акватории Белохолуницкого вдхр. проводили с моторной лодки в июле — августе 2016—2022 гг. в период максимального развития большинства водных растений. При обследовании водоёма отмечали обнаруженные виды ВВР, координаты их местоположения на акватории и размеры зарослей. Прозрачность воды во время наблюдений составляла 1,0—1,3 м. Уровни воды в водохранилище даны в Балтийской системе высот. Степень зарастания водоёма определяли как отношение площади зарослей ВВР к площади акватории водохранилища, выраженное в процентах. Оценку степени зарастания проводили по классификации В. Г. Папченкова, выделяющей 8 классов водоёмов: 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 % (Папченков, 2001).

Участки с зарослями ВВР в поверхностном слое воды также определяли по данным дистанционного зондирования Земли. В качестве источника для дешифрирования данных ДЗЗ были задействованы снимки 2016—2022 гг. со спутника Sentinel-2A (использовали каналы с разрешением 10 м), находящиеся в открытом доступе на сайте <https://eos.com>. Для дешифрирования выбирали малооблачные снимки, сделанные в период с мая по сентябрь, когда большинство водных растений находятся в стадии вегетации. Всего было проанализировано 23 разновременных снимка. В ходе работ для определения границ водоёма проводили расчёт нормализованного разностного водного индекса (*англ.* Normalized Difference Water Index — NDWI) (Ji et al., 2009), а для выделения зарослей ВВР — нормализованного разностного вегетационного индекса (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index — NDVI) (Rouse et al., 1974) и индекса растительности с поправкой на воду (*англ.* Water Adjusted Vegetation Index — WAVI) (Villa et al., 2014). Основным объектом при классификации снимков ДЗЗ были воздушно-водные растения, у которых часть побегов находится в воде, а часть располагается над вод-

ной поверхностью. Как было показано в работе Е. Л. Хестир с соавторами (Hestir et al., 2015), WAVI также чувствителен к плавающим, полностью погружённым в воду растениям, обитающим в верхнем слое воды (на глубине около 5 см). Площадь зарастания акватории ВВР определяли на основе результатов вычисления NDVI и WAVI, рассчитываемых по формулам:

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{RED}}{\text{NIR} + \text{RED}}, \quad \text{WAVI} = (1 + L) \frac{\text{NIR} - \text{BLUE}}{\text{NIR} + \text{BLUE} + L},$$

где NIR (англ. near infrared) — отражение в ближней инфракрасной области спектра (канал В4); RED — в красной области видимого спектра (канал В3); BLUE — в синей области видимого спектра (канал В2); L — поправочный коэффициент фона (растительного покрова), принимающий значения от 0 до 1 (Villa et al., 2014). В работе (Villa et al., 2014) в качестве поправочного коэффициента L принято значение 0,5 и отмечено, что $L = 0,5$ заметно снижает влияние фона для водоёмов со средней степенью зарастания и является лучшим вариантом в случае отсутствия достоверных данных о плотности растительного покрова. В настоящей работе в качестве поправочного коэффициента L также принято значение 0,5.

Значения NDVI и WAVI ниже нуля соответствовали участкам открытой воды, свободным от ВВР, значения вегетационных индексов выше нуля — зарослям водных растений. После расчёта NDVI и WAVI и выявления участков, занятых ВВР, создавали векторные слои, состоящие из полигональных объектов. Площади полигонов рассчитывали автоматически встроенной в геоинформационную систему QGIS (англ. Quantum Geographic Information Systems) функцией расчёта площади в инструменте «Калькулятор полей», затем суммировали. Для обработки данных использовали программный продукт QGIS Desktop 3.26.3. Верификацию полученных при расчёте NDVI и WAVI результатов проводили по данным подспутниковых наблюдений и снимкам с сервиса Google Планета Земля Pro (англ. Google Earth Pro).

Результаты и обсуждение

Результаты подспутниковых наблюдений

Исследуемый водоём представляет собой русловое равнинное водохранилище. Максимальные глубины (от 5 до 11 м) наблюдаются вдоль русла р. Белая Холуница и на приплотинном участке водохранилища. Верховье и центральная часть объекта исследования — это преимущественно мелководные участки с замедленным течением. Именно на этих участках были обнаружены крупные заросли ВВР (рис. 1, см. с. 302).

Видовой состав ВВР в исследуемом водохранилище небольшой, представлен преимущественно эвритопными видами, приспособленными к широкому диапазону факторов окружающей среды. Согласно классификации В. Г. Папченкова встреченные виды растений относятся преимущественно к экотипам настоящих водных и прибрежно-водных растений. По видовому разнообразию в Белохолуницком вдхр. преобладают рдесты: блестящий, плавающий, пронзённолистный и сплюснутый (*Potamogeton lucens* L., *P. natans* L., *P. perfoliatus* L., *P. compressus* L.). Значительные площади акватории занимают рогоз узколистый (*Typha angustifolia* L.), камыш озёрный (*Schoenoplectus lacustris* (L.) Palla), кувшинка чисто-белая (*Nymphaea candida* J. Presl et C. Presl), горец земноводный (*Persicaria amphibia* (L.) Delarbre), тростник южный (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.) и рдесты. Все растения находятся в хорошем жизненном состоянии. Тип зарастания водоёма — фрагментарный.

Встреченные в Белохолуницком вдхр. ВВР широко распространены в водоёмах средней полосы. Например, блестящий, плавающий, пронзённолистный и сплюснутый рдесты часто отмечаются в водоёмах Вятско-Камского Предуралья (Капитонова, 2015). Многие из обнаруженных видов являются индикаторами эвтрофирования и загрязнения водоёмов (рогоз узколистый, кувшинка чисто-белая, роголистник погружённый и др.). Большие площади акватории водохранилища заняты зарослями блестящего, плавающего и сплюснутого рдестов, которые часто отмечаются в мезо- и эвтрофных водоёмах, выдерживают умеренное антропогенное загрязнение.



Рис. 1. Заросли высших водных растений на центральном участке Белохолуницкого вдхр. (дата съёмки 03.08.2022)

Результаты дешифрирования космоснимков

На первом этапе работы с космоснимками определяли границы Белохолуницкого вдхр. Согласно литературным данным, наиболее часто для выделения водных объектов используется NDWI и модифицированный нормализованный разностный водный индекс (англ. Modified Normalized Difference Water Index — MNDWI) (Дубачева, 2021; Николаева, 2023; Pirali Zefrehei et al., 2021; Rylov, Pestunov, 2019). Отличие MNDWI от NDWI состоит в том, что для его расчёта используется канал B11 с коротковолновым инфракрасным диапазоном (англ. short wave infrared — SWIR) вместо NIR. Так как для снимков со спутника Sentinel-2 канал SWIR (B11) имеет разрешение 20 м, это снижает пространственную точность получаемых результатов по сравнению с использованием NDWI (Rylov, Pestunov, 2019). В связи с этим для определения границ Белохолуницкого вдхр. проводили расчёт только NDWI. После выделения границ водоёма рассчитывали площадь его акватории. За период с 2016 по 2022 г. площадь акватории изменялась в пределах 14,79–16,08 км², что связано с изменением уровня воды в водохранилище в разные годы (таблица).

На следующем этапе проводили расчёт NDVI и WAVI для выявления зарослей ВВР. Согласно полученным результатам, заросли прибрежно-водных и настоящих водных растений в период с 2016 по 2022 г. занимали от 12 до 24 % площади акватории Белохолуницкого вдхр. (см. таблицу). Исходя из данных подспутниковых наблюдений можно отметить, что в зафиксированных на космоснимках зарослях преобладали тростник южный, рогоз узколистный, камыш озёрный, кувшинка чисто-белая, горец земноводный и рдесты (плавающий, блестящий, пронзённолистный).

Как показали результаты исследования, площади зарастания ВВР, определённые по данным расчёта NDVI и WAVI (см. таблицу), в большинстве случаев были довольно близки между собой (разница не более 5,75 %) и соответствовали данным подспутниковых наблюдений.

Исключение составили только данные за 2022 г., когда степень зарастания водохранилища, определённая с помощью NDVI и WAVI, отличалась на 10,26 %. В 2022 г. наблюдалось интенсивное развитие прибрежно-водной растительности (тростника южного и рогоза узколистного) вдоль правого берега водохранилища. Вероятно, NDVI оказался более чувствительным к сообществам прибрежно-водной растительности по сравнению с WAVI, который предназначен для выявления только водной растительности. В целом, согласно полученным данным, расчёт индексов NDVI и WAVI позволяет достоверно определить степень зарастания водоёмов. Информативность NDVI и WAVI при определении зарослей ВВР в водоёмах отмечали и другие исследователи. Так, на примере оз. Большое Топольное было показано, что индексы NDVI, WAVI и модифицированный индекс растительности с коррекцией по почве (*англ.* Modified Soil-Adjusted Vegetation Index 2 — MSAVI2) пригодны для определения границ зарастания водоёмов водной и околоводной растительностью на участках с площадью до 100–900 м², при этом наиболее результативным признан NDVI (Головин и др., 2023). При оценке площадей зарастания трёх русловых водохранилищ в Польше (Пшебендово (*польск.* Przebędowo), Ежево (*польск.* Jezewo), оз. Ковальское (*польск.* Jezioro Kowalskie)) с помощью NDVI, WAVI, вегетационного индекса, устойчивого к влиянию атмосферы (*англ.* Atmospherically Resistant Vegetation Index — ARVI), нормализованного разностного индекса хлорофилла *a* (*англ.* Normalized Difference Chlorophyll Index — NDCI) и нормализованного разностного индекса водной растительности (*англ.* Normalized Difference Aquatic Vegetation Index — NDAVI) наиболее близкие к данным ортофотоплана высокого разрешения результаты показал WAVI, ошибка составила от 0,6 до 6,8 % для разных водоёмов (Jaskuła, Sojka, 2019).

Площадь зарастания прибрежно-водными и настоящими водными растениями акватории Белохолуницкого вдхр. в 2016–2022 гг.

Год исследования	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Площадь (км ²) зарастания надводной растительностью, определённая:							
• по NDVI	3,305	2,988	3,224	1,842	3,520	2,369	3,698
• по WAVI	3,790	3,205	3,415	2,714	3,049	2,889	2,089
Площадь (км ²) акватории водохранилища (по расчёту NDWI)	15,853	15,696	15,393	15,183	16,075	15,862	15,684
Уровень (м) воды (среднегодовой)	139,84±0,43	139,93±0,35	140,06±0,44	140,15±0,52	140,17±0,29	139,87±0,50	140,03±0,45
Степень (%) зарастания по NDVI/WAVI	20,85/23,91	19,04/20,42	20,94/22,19	12,13/17,88	21,90/18,97	14,94/18,21	23,58/13,32

Практический интерес представляют пространственное распределение и динамика зарастания водоёма. Согласно данным дешифрирования космоснимков, зарастание Белохолуницкого вдхр. носит локальный, фрагментарный характер (*рис. 2, 3*, см. с. 304). Крупные заросли ВВР ежегодно отмечаются на двух участках водохранилища: от места впадения в него р. Белая Холуница до места впадения р. Копья и в районе дер. Шитово, на центральном участке вдоль правого берега. Зарастание акватории Белохолуницкого вдхр. происходит в направлении от берегов к центру акватории, преимущественно вдоль правого, более низкого и пологого берега водоёма. Благодаря зарослям ВВР на этом участке складываются наиболее благоприятные условия для развития и размножения различных гидробионтов, в том числе рыбного населения водоёма.

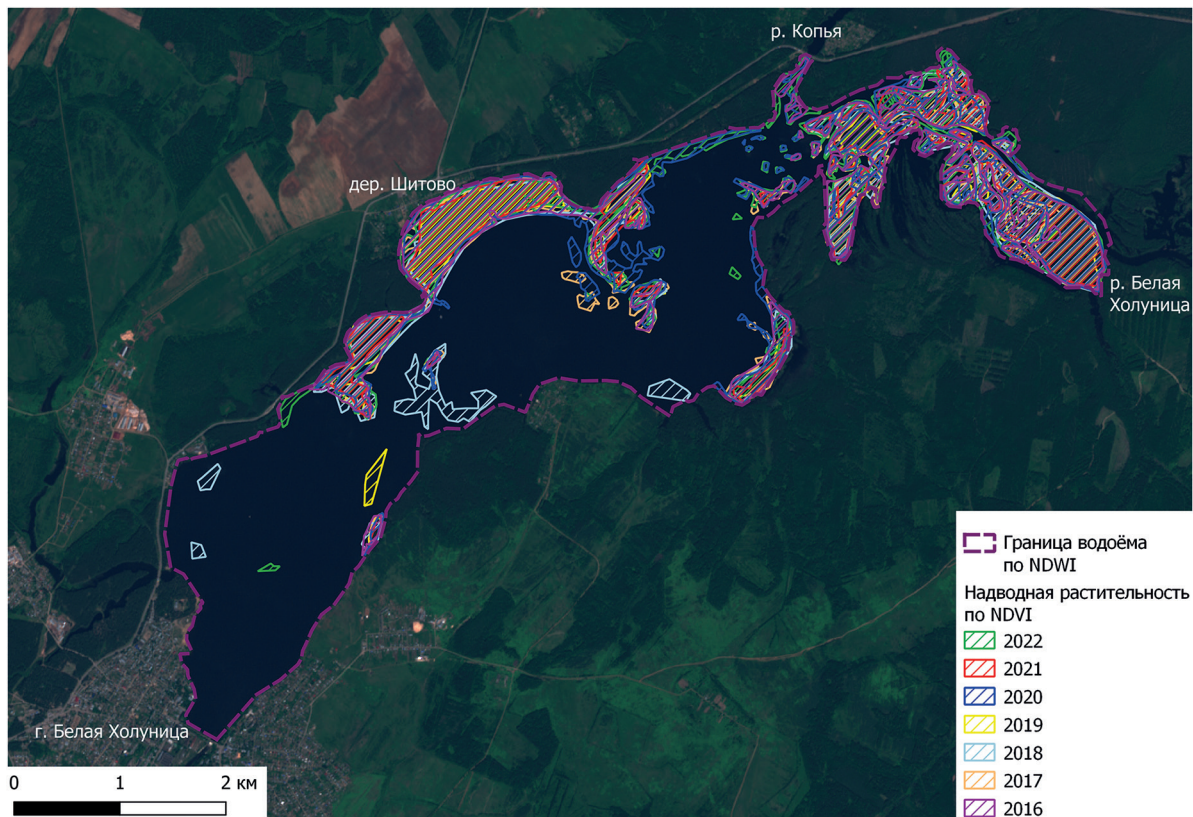


Рис. 2. Карта-схема участков зарастания акватории Белохолуницкого вдхр. в 2016–2022 гг., выделенных по результатам расчёта NDVI

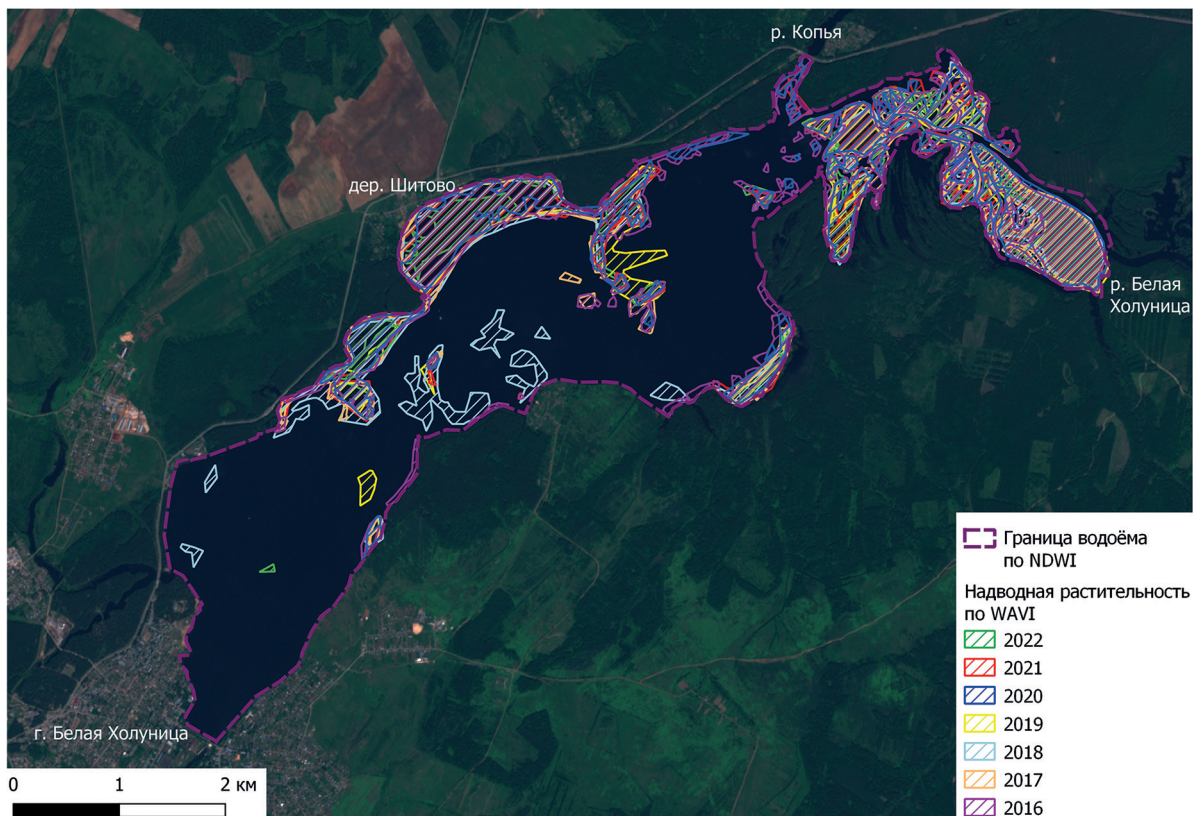


Рис. 3. Карта-схема участков зарастания акватории Белохолуницкого вдхр. в 2016–2022 гг., выделенных по результатам расчёта WAVI

Согласно данным подспутниковых наблюдений и дешифрирования космоснимков, интенсивность зарастания Белохолуницкого вдхр. в период 2016–2022 гг. была невысокой. Минимальная площадь зарастания ВВР акватории водоёма зафиксирована в 2019 г. (см. таблицу), что было связано с влиянием температурного режима среды. Средняя температура воздуха в июле 2019 г. составляла 15,26 °С, в то время как в другие годы исследования — 17,37–20,06 °С.

Процессы зарастания акватории, наблюдаемые нами в Белохолуницком вдхр., аналогичны процессам, описанным в работе В. Г. Папченкова (2001) для равнинных водохранилищ с относительно постоянным уровнем воды. Распространение зарослей ВВР вглубь изучаемого водоёма сдерживается большими глубинами, характерными для русла р. Белая Холуница, невысоким содержанием питательных элементов в воде и донных отложениях водоёма. В целом по степени зарастания ВВР Белохолуницкое вдхр. можно отнести к умеренно заросшим водоёмам.

Заключение

С помощью данных подспутниковых наблюдений и результатов дешифрирования космоснимков со спутника Sentinel-2A выделены участки на Белохолуницком вдхр., ежегодно или периодически занимаемые зарослями настоящих водных и прибрежно-водных растений, а также участки с открытой водой. Отмечено, что заросли водных растений с плавающими на поверхности воды листьями занимают от 12 до 24 % акватории водохранилища, что характерно для умеренно заросших водоёмов. Видовой состав встреченных растений небольшой, насчитывает 13 видов. При этом крупные заросли на водохранилище образуют только восемь видов растений: тростник южный, рогоз узколистный, камыш озёрный, кувшинка чисто-белая, горец земноводный и рдесты (плавающий, блестящий, пронзённолистный). Эти растения широко распространены в водоёмах средней полосы, часто отмечаются в мезотрофных и эвтрофных водных объектах с замедленным течением воды. Расчёт вегетационных индексов NDVI и WAVI позволил определить площадь зарастания акватории ВВР и оценить степень зарастания изучаемого водоёма. Полученные данные проведённого зондирования акватории Белохолуницкого вдхр. по распространению высших водных растений могут быть использованы в гидробиологических исследованиях и для анализа рыбохозяйственной ценности водоёма.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН по теме «Структура и состояние компонентов техногенных экосистем подзоны южной тайги», государственная регистрация в ЕГИСУ № 1220401000325, и в рамках гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых учёных — кандидатов наук (МК-5830.2021.1.5).

Авторы благодарят Отдел водных ресурсов по Удмуртской Республике (г. Ижевск) и Кировской обл. (г. Киров) Камского бассейнового водного управления Федерального агентства водных ресурсов за информацию об уровнях воды.

Литература

1. Водохозяйственный паспорт Белохолуницкого водохранилища / сост. РОСГИПРОВОДХОЗ, 1981.
2. Головин А. В., Стоящева Н. В., Ковалевская Н. М. Оценка динамики состояния природных комплексов побережья озера Большое Топольное (Алтайский край) с помощью временного ряда многоспектральных данных различного разрешения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 2. С. 166–173. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-2-166-173.
3. Дубачева А. А. Автоматизированное дешифрирование границ водных объектов и прилегающих территорий с использованием индексов мультиспектральных данных дистанционного зондирования Земли // Инновации. Наука. Образование. 2021. № 48. С. 1740–1744.

4. Капитонова О. А. Рдестовые (Potamogetonaceae Dumort.) во флоре макрофитов Вятско-Камского Предуралья // Тр. Ин-та биологии внутренних вод РАН. 2015. № 71(74). С. 60–71.
5. Мартыненко В. П., Мерзвинский Л. М., Становая Ю. Л. Высшая водная растительность озера Дрисы // Веснік Віцебскага дзяржаўнага ўніверсітэта. 2011. № 3(63). С. 53–59.
6. Николаева О. В. Алгоритм обнаружения водных объектов на многоспектральных снимках // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 3. С. 9–18. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-3-9-18.
7. Папченков В. Г. Растительный покров водоемов и водотоков Среднего Поволжья. Ярославль: ЦМП МУБиНТ, 2001. 214 с.
8. Садчиков А. П., Кудряшов М. А. Экология прибрежно-водной растительности: учеб. пособие для студентов вузов. М.: Изд-во «НИА-Природа», РЭФИА, 2004. 220 с.
9. Hestir E. L., Brando V. E., Bresciani M. et al. Measuring freshwater aquatic ecosystems: The need for a hyperspectral global mapping satellite mission // Remote Sensing of Environment. 2015. No. 167. P. 181–195. DOI: 10.1016/j.rse.2015.05.023.
10. Jaskuła J., Sojka M. Assessing spectral indices for detecting vegetative overgrowth of reservoirs // Polish J. Environmental Studies. 2019. V. 28. No. 6. P. 4199–4211. DOI: 10.15244/pjoes/98994.
11. Ji L., Zhang L., Wylie B. Analysis of dynamic thresholds for the Normalized Difference Water Index // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 2009. V. 75. No. 11. P. 1307–1317.
12. Pirali Zefrehei A. R., Fallah M., Hedayati A. Applying remote sensing techniques to changes of water body and aquatic plants in Anzali International Wetland (1985–2018) // Theoretical and Applied Ecology. 2021. No. 1. P. 65–72. DOI: 10.25750/1995-4301-2021-1-065-072.
13. Rouse Jr. J., Haas R. H., Schell J. A., Deering D. W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS // NASA Technical Reports Server. 1974. P. 309–317.
14. Rylov S. A., Pestunov I. A. Assessment of lakes areas by Sentinel-2 Satellite Data // J. Siberian Federal University. Engineering and Technologies. 2019. V. 12. No. 5. P. 526–535. DOI: 10.17516/1999-494X-0108.
15. Villa P., Mousivand A., Bresciani M. Aquatic vegetation indices assessment through radiative transfer modeling and linear mixture simulation // Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation. 2014. No. 30. P. 113–127. DOI: 10.1016/j.jag.2014.01.017.

Evaluation of the dynamics of overgrowth of higher aquatic plants in the water area of an eutrophic reservoir using satellite images

T. I. Kutyavina¹, V. V. Rutman¹, T. Ya. Ashikhmina^{1,2}

¹ Vyatka State University, Kirov 610000, Russia
E-mail: kutyavinati@gmail.com

² Institute of Biology, Komi Science Centre UrB RAS, Syktyvkar 167982, Russia
E-mail: ecolab2@gmail.com

Communities of aquatic plants create organic matter, which serves as the basis for animal nutrition in water bodies and is an ecological niche for the development and reproduction of aquatic organisms. At the same time, higher aquatic plants are informative indicators of the state of the aquatic environment, the species composition and degree of development of which can be used to assess the degree of impact of natural and anthropogenic factors. The purpose of the work is to identify the dominant species of higher aquatic plants and their distribution in the water area of an eutrophic reservoir over a 7-year period, as well as to estimate the area of overgrowth of the reservoir using Earth remote sensing data. The species composition of aquatic plants was determined during summer route observations at the Belokholunitsky reservoir of Kirov Region in 2016–2022. The boundaries of the reservoir and thickets of higher aquatic plants in the water area were identified from multi-temporal Sentinel-2 satellite images based on vegetation indices, namely Normalized Difference Water Index (NDWI), Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and Water Adjusted Vegetation Index (WAVI). The areas overgrown with aquatic plants were calculated using the QGIS Desktop 3.26.3 software product. In the thickets, 8 dominant species of aquatic plants were identified. The maximum areas of overgrowth were noted in the upper reaches and along the right bank in the central section of the reservoir. The nature of the reservoir overgrowth is fragmentary. The area overgrown with aquatic veg-

etation in the reservoir in different years varied in the range from 12 to 24 %, which is associated with fluctuations in the water level in the reservoir. The results of studying the higher aquatic vegetation of the Belokholunitsky reservoir can be used as a basis for conducting hydrobiological studies and analyzing the fishery value of the reservoir.

Keywords: reservoir, higher aquatic plants, Sentinel-2, vegetation indices

Accepted: 15.01.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-1-299-307

References

1. *Vodokhozyaistvennyi pasport Belokholunitskogo vodokhranilishcha* (Water management passport of the Belokholunitsky reservoir), ROSGIPROVODKhoz, 1981 (in Russian).
2. Golovin A. V., Stoyashcheva N. V., Kovalevskaya N. M., Estimation of the dynamics of the state of natural complexes of the coast of Lake Bolshoye Topolnoe (Altai Territory) using a time series of multispectral data of various resolutions, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2023, Vol. 20, No. 2, pp. 166–173 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-2-166-173.
3. Dubacheva A. A., Automated interpretation of the boundaries of water bodies and adjacent territories using indices of multispectral Earth remote sensing data, *Innovatsii. Nauka. Obrazovanie*, 2021, No. 48, pp. 1740–1744 (in Russian).
4. Kapitonova O. A., Pods (Potamogetonaceae Dumort.) in the macrophyte flora of the Vyatka-Kama Cis-Urals, *Trudy Instituta biologii vnutrennikh vod RAN*, 2015, No. 71(74), pp. 60–71 (in Russian).
5. Martynenko V. P., Merzhvinskiy L. M., Stanovaya Yu. L., Higher aquatic vegetation of Lake Drysy, *Vestnik Vitebskaya dzyarzhaynaga yuniversiteta*, 2011, No. 3(63), pp. 53–59 (in Russian).
6. Nikolaeva O. V., Algorithm for detecting water objects on multispectral images, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2023, Vol. 20, No. 3, pp. 9–18 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-3-9-18.
7. Papchenkov V. G., *Rastitelnyi pokrov vodoemov i vodotokov Srednego Povolzhya* (Vegetation cover of reservoirs and watercourses of the Middle Volga region), Yaroslavl: TsMP MUBiNT, 2001, 214 p. (in Russian).
8. Sadchikov A. P., Kudryashov M. A., *Ekologiya pribrezhno-vodnoi rastitelnosti, uchebnoe posobie dlya studentov vuzov* (Ecology of coastal aquatic vegetation), Moscow: Izd. NIA-Priroda, REFIA, 2004, 220 p. (in Russian).
9. Hestir E. L., Brando V. E., Bresciani M. et al., Measuring freshwater aquatic ecosystems: The need for a hyperspectral global mapping satellite mission, *Remote Sensing of Environment*, 2015, No. 167, pp. 181–195, DOI: 10.1016/j.rse.2015.05.023.
10. Jaskuła J., Sojka M., Assessing spectral indices for detecting vegetative overgrowth of reservoirs, *Polish J. Environmental Studies*, 2019, Vol. 28, No. 6, pp. 4199–4211, DOI: 10.15244/pjoes/98994.
11. Ji L., Zhang L., Wylie B., Analysis of dynamic thresholds for the Normalized Difference Water Index, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2009, Vol. 75, No. 11, pp. 1307–1317.
12. Pirali Zefrehei A. R., Fallah M., Hedayati A., Applying remote sensing techniques to changes of water body and aquatic plants in Anzali International Wetland (1985–2018), *Theoretical and Applied Ecology*, 2021, No. 1, pp. 65–72, DOI: 10.25750/1995-4301-2021-1-065-072.
13. Rouse Jr. J., Haas R. H., Schell J. A., Deering D. W., Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS, *NASA Technical Reports Server*, 1974, pp. 309–317.
14. Rylov S. A., Pestunov I. A., Assessment of lakes areas by Sentinel-2 Satellite Data, *J. Siberian Federal University. Engineering and Technologies*, 2019, Vol. 12, No. 5, pp. 526–535, DOI: 10.17516/1999-494X-0108.
15. Villa P., Mousivand A., Bresciani M., Aquatic vegetation indices assessment through radiative transfer modeling and linear mixture simulation, *Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2014, No. 30, pp. 113–127, DOI: 10.1016/j.jag.2014.01.017.