

Водные биоресурсы и среда обитания

2021, том 4, номер 4, с. 14–26

<http://journal.azniirkh.ru>, www.azniirkh.ru

doi: 10.47921/2619-1024_2021_4_4_14

ISSN 2618-8147 print, ISSN 2619-1024 online



Aquatic Bioresources & Environment

2021, vol. 4, no. 4, pp. 14–26

<http://journal.azniirkh.ru>, www.azniirkh.ru

doi: 10.47921/2619-1024_2021_4_4_14

ISSN 2618-8147 print, ISSN 2619-1024 online

УДК 574.58

ОЦЕНКА ЗАРАСТАНИЯ ВОДНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТЬЮ ЧЕЛБАССКОЙ ГРУППЫ АЗОВСКИХ ЛИМАНОВ

© 2021 Л. Г. Бондаренко, С. Н. Кульба, В. И. Петрашов,
С. С. Смирнов, Е. И. Матвеева, Н. А. Рудакова

*Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии (ФГБНУ «ВНИРО»),
Азово-Черноморский филиал ФГБНУ «ВНИРО» («АзНИИРХ»), Ростов-на-Дону 344002, Россия
E-mail: l_g_bondarenko@azniirkh.ru*

Аннотация. Челбасские лиманы играют важную роль в воспроизводстве полупроходных рыб. Эффективность нереста тесно связана с зарастанием нерестилищ, поэтому изучение водной растительности в лиманах имеет важное рыбохозяйственное значение. Целью исследований являлось изучение площади и интенсивности зарастания водной растительностью Челбасских лиманов с использованием методов ДЗЗ и ГИС-технологий. Представлены материалы о динамике зарастания азовских лиманов Челбасской группы в период 2016–2021 гг. Оценка зарастания водоемов выполнена с использованием водного индекса MNDWI и радиометрического вегетационного индекса NDVI, которые рассчитывались по мультиспектральным снимкам спутника Европейского космического агентства Sentinel-2. Данные спутникового дистанционного зондирования сопоставлены с данными ботанических съемок и визуальных наблюдений. Площадь зарастания водной растительностью в лимане Кущеватый менялась в диапазоне от 15 до 93 %, в лимане Горький — 12–65 %, в лимане Сладкий площадь зарастания не превышала 1,7 %. Предложена четырехуровневая классификация зарастания водоемов по индексу NDVI: класс 0 — от -1,0 до -0,1, класс 1 — от -0,1 до 0,3, класс 2 — от 0,3 до 0,5, класс 3 — от 0,5 до 1,0. Исследование водной растительности Челбасских лиманов показало зависимость площади зарастания этих водоемов макрофитами от режима поступления пресной и морской воды в лиманы.

Ключевые слова: азовские лиманы, водная растительность, макрофиты, тростник, спутник Sentinel-2, ГИС-технологии

ASSESSMENT OF OVERGROWTH OF THE CHELBAS GROUP OF THE AZOV SEA LIMANS WITH AQUATIC VEGETATION

L. G. Bondarenko, S. N. Kulba, V. I. Petrashov,
S. S. Smirnov, E. I. Matveeva, N. A. Rudakova

*Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography (FSBSI “VNIRO”),
Azov-Black Sea Branch of the FSBSI “VNIRO” (“AzNIIRKH”), Rostov-on-Don 344002, Russia
E-mail: l_g_bondarenko@azniirkh.ru*

Abstract. The Chelbas Limans play crucial role in the reproduction of semi-anadromous fish species. The efficiency of their spawning is closely related to the overgrowth of spawning grounds, therefore, the study of aquatic vegetation in the limans is essential for fisheries. This study is aimed at the investigation of the area and intensity of overgrowth of the Chelbas Limans with aquatic vegetation using remote sensing and GIS technologies. The materials on the dynamics of overgrowth of the Azov Sea limans belonging to the Chelbas group are presented for the period 2016–2021. The assessment of the overgrowth of these water bodies was carried out using the Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI) and the radiometric Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), which were calculated from the multispectral images of the European Space Agency Sentinel-2 satellite. The data of satellite remote sensing have been compared with the data of botanical surveys and visual observations. The area of overgrowth with aquatic vegetation in the Kushchevaty Liman varied within the range from 15 to 93 %, in the Gorkiy Liman it ranged within 12–65 %, and in the Sladkiy Liman the overgrowth area did not exceed 1.7 %. A four-level classification of the overgrowth of the water bodies according to the NDVI is proposed: class 0 is from -1.0 to -0.1, class 1 is from -0.1 to 0.3, class 2 is from 0.3 to 0.5, and class 3 is from 0.5 to 1.0. Examination of the aquatic vegetation in the Chelbas Limans has shown the dependence of the area of overgrowth of these water bodies with macrophytes on the regime of freshwater and seawater influx to the limans.

Keywords: Azov Sea limans, aquatic vegetation, macrophytes, reed, Sentinel-2 satellite, GIS technologies

ВВЕДЕНИЕ

Челбасские лиманы, относящиеся к азовским лиманам, имеют важное значение для воспроизводства рыбных запасов. В современный период объемы воспроизводства в этих водоемах судака в среднем находятся на уровне 4,7 млн экз., тарани — 27,2 млн экз. Важным условием эффективного воспроизводства этих рыб является состояние нерестилищ, связанное с количественным и качественным составом макрофитов на нерестилищах. Так, для нерестилищ судака продуктивность фитомассы не должна превышать 10–15 т/га в сыром весе, а для тарани — 30 т/га [1]. Чрезмерное зарастание водоемов водной растительностью ухудшает состояние нерестовых миграционных путей, приводит к сокращению площади нерестилищ и нагула промысловых видов рыб. Поэтому изучение видового состава, а также определение площади проективного покрытия и биомассы высшей водной растительности в азовских лиманах является актуальной темой и имеет важное рыбохозяйственное значение. Современное состояние зарастания лиманов слабо изучено. Челбасские лиманы труднодоступны для исследований в связи с низкими уровнями воды и заиливанием межлиманных соединений. Поэтому для изучения этих водоемов представляется перспективным использование геоинформационных технологий (ГИС-технологий) и методов дистанционного зондирования земли (ДЗЗ): аэрофотосъемки и спутниковые снимки.

Целью исследований являлось изучение площади и интенсивности зарастания водной расти-

тельностью Челбасских лиманов с использованием методов ДЗЗ и ГИС-технологий.

Предметом исследований были настоящие водные растения или гидрофиты — свободно плавающие на поверхности воды или в ее толще, погруженные укореняющиеся растения с плавающими листьями или без них, а также макроросли и воздушно-водные растения или гелофиты.

При типизации водных объектов по характеру и степени зарастания водной растительностью учитывают экотипы, доминирующий класс формаций и видовой состав растений, а также степень зарастания [2–5]. Количественная оценка степени зарастания требует определения площади проективного покрытия водоема растительностью. До 80-х гг. XX века о площади проективного покрытия водоема растительностью судили по натурным съемкам и аэрофотосъемкам. При изучении пространственного распространения растительности на больших территориях наиболее эффективны дистанционные методы исследований. Обзор дистанционных исследований водноболотных угодий с помощью ГИС-технологий подробно изложен в работе Al Sghair, Fathi Goma [6]. Для картирования водной растительности широко используются спектральные индексы, получаемые при обработке мультиспектральных спутниковых снимков. Среди таких индексов наибольшую популярность получил вегетационный индекс NDVI и его модификации [7].

Использование спутниковых снимков позволяет с достаточно высокой точностью оценить площадь

зарастания водоема [8–17]. Биомассу и численность растений можно надежно определить только с помощью натуральных съемок.

Растительность азовских лиманов

Детальные работы по исследованию растительности азовских лиманов проведены в шестидесятих годах А.Г. Шеховым [5]. По его данным флора лиманов включает 103 вида макрофитов. Наибольшее количество видов (30) содержат семейства осоковые, рдестовые и злаковые. А.Г. Шехов разделил растительные сообщества лиманов в зависимости от экологических особенностей доминантов на шесть классов формаций, а все азовские лиманы, согласно фитоценотической классификации, — на шесть типов: 1 — рдестово-пронзеннолистные, 2 — рдестово-курчавые, 3 — урутьево-рдестовые, 4 — урутьево-рдестово-харовые, 5 — харово-роголистниковые, 6 — плавневые.

Согласно данным Е.П. Цуниковой [1], биомасса мягкой растительности в азовских лиманах, включая лиманные нерестово-выростные хозяйства (НВХ), с середины 1960-х гг. до 2005 г. увеличилась в 1,5 раза, достигнув 2550 тыс. т, что в среднем составило 39,6 т/га; при этом площадь открытой водной поверхности, которая является косвенным показателем зарастания водоемов, ежегодно уменьшалась на 500 га.

В литературе нет сведений о зарастании Челбасской группы азовских лиманов после 2005 г., но есть данные о зарастании другой группы лиманов — Куликово-Курчанской. Детальное исследование зарастания Куликово-Курчанской группы азовских лиманов с использованием серии спутниковых снимков за период 1984–2014 гг. было проведено М.В. Антоненко и др. [18]. Зарастание этих лиманов рассчитывали с использованием вегетационного индекса NDVI. Результаты данных исследований не выявили каких-либо необратимых признаков деградации Куликово-Курчанской группы лиманов. По материалам статьи площадь 14 лиманов за 30 лет сократилась на 10,9 %, при этом сезонный и, в целом, годовой уровень зарастания лиманов варьирует в большом диапазоне в зависимости от глубины лиманов и водности. Наименьшая площадь зарастания водной растительностью отмечена в Курчанском лимане (в среднем 2 %), наибольшая — в Ордынском (в среднем 80 %). Сезонная величина зарастания ряда лиманов варьирует в большом диапазоне (2–100 %). Максимальное зарастание (29,9 %) отмечено в 1988 г., минимальное (5,7 %)

— в 2013 г. (рассчитано от общей площади 14 лиманов).

Представляется актуальным исследовать уровень зарастания Челбасской группы азовских лиманов в современный период.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Челбасские лиманы расположены на восточном побережье Азовского моря, в пойме реки Челбас, берущей начало в степной зоне Краснодарского края и впадающей в Бейсугский лиман (рис. 1).

По географическому положению Челбасские лиманы делятся на 2 подгруппы: западную и восточную. Работы по водной растительности проведены в восточной группе лиманов, имеющих рыбохозяйственное значение: Кущеватый — 1505 га, Горький — 2224 га и Сладкий — 2291 га.

Для работы с пространственными данными за картографическую основу были взяты карты ФГУП «Госгисцентр». Карты Госгисцентра использовались для определения береговой линии и площади исследуемых водоемов. Площадь зарастания лиманов водной растительностью определяли по снимкам, полученным с помощью спутника Европейского космического агентства Sentinel-2. В работе было использовано 12 спутниковых снимков, сделанных в весенне-летний период в 2016–2021 гг. Для выделения водной поверхности использовали водный индекс (MNDWI — Normalized Difference Water Index — модифицированный нормализованный разностный водный индекс), а в качестве индикатора растительности — радиометрический вегетационный индекс (NDVI — Normalized Difference Vegetation Index — нормализованный относительный индекс растительности, показатель количества фотосинтетически активной биомассы).

Для классификации зарастания водоемов нами был использован вегетационный индекс NDVI, с помощью которого были выделены следующие классы:

- 0 класс — от -1,0 до -0,1;
- 1 класс — от -0,1 до 0,3;
- 2 класс — от 0,3 до 0,5;
- 3 класс — от 0,5 до 1,0.

Площадь зарастания лиманов тростником, который является самым распространенным видом воздушно-водных растений в лиманах, определяли по ранневесенним спутниковым снимкам, используя водный индекс MNDWI. Площадь зарастания

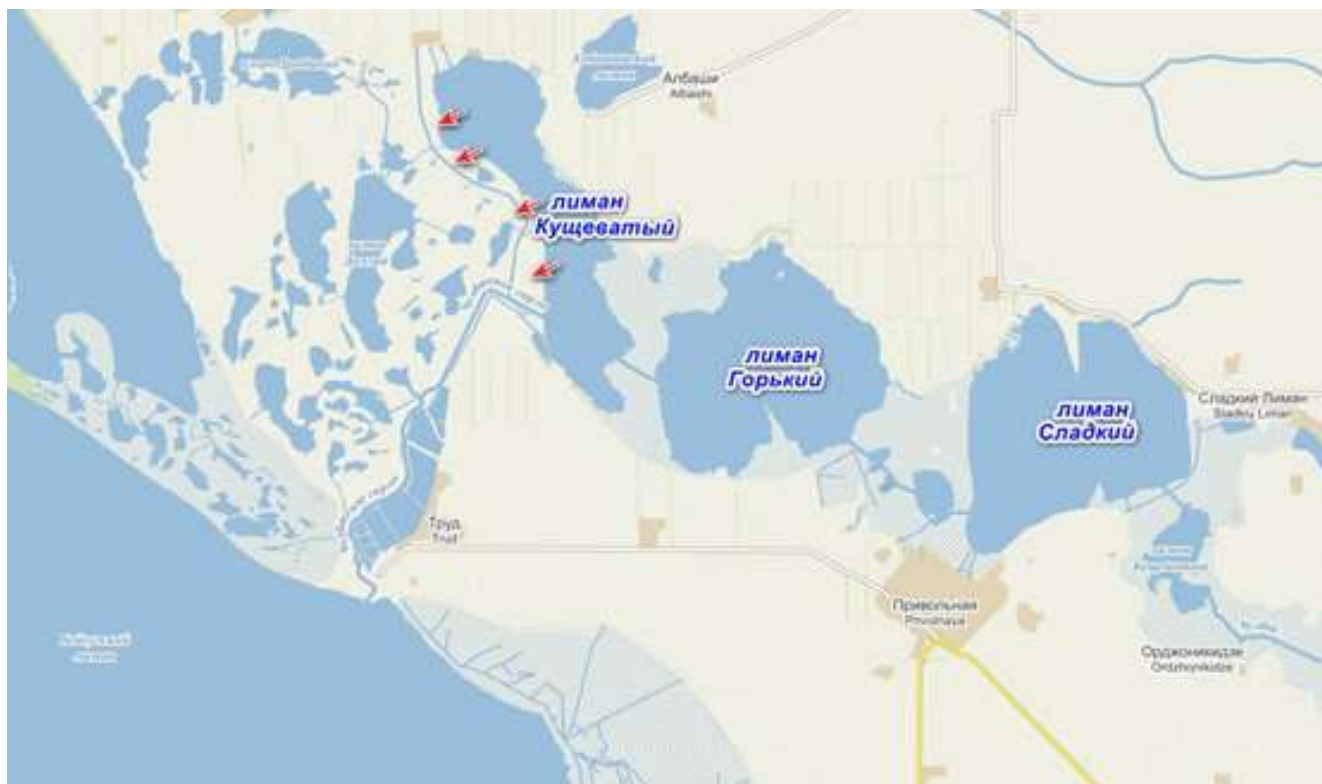


Рис. 1. Карта-схема Челбасских лиманов. Красная стрелка — проран

Fig. 1. Outline map of the Chelbas Limans. Red arrow denotes a break through the coast for water passage

макрофитами вычисляли по разнице суммы площадей 1–3 классов зарастания и площади зарастания тростником. О точности дистанционного изучения степени зарастания лиманов судили по данным ботанических съемок и визуальным наблюдениям, проведенным в 2018–2021 гг.

Исследования проводили в конце июня – начале июля, в период, когда снижается глубина лиманов и легче проводить съемки. В маловодном 2020 г. съемки проводили в конце мая и начале июля. Визуальные наблюдения за зарастанием растительностью проводили методом детально-маршрутного исследования с подробным описанием водных фитоценозов. Сетку станций отбора проб выбирали, исходя из задачи расшифровки космических снимков по площади зарастания лиманов. В 2018 г. в лиманах Горький и Кущеватый пробы были отобраны в одной повторности на 41 станции по двум разрезам; среднее расстояние между станциями составляло 150 м. В 2019–2020 гг. после анализа спутниковых снимков, сделанных перед съемкой, в каждом классе зарастания отбиралось по 7 проб растительности. В 2018–2019 гг. растительность отбирали с помощью рамки размером 50×50 см, в

2020 г. — прибором А.Г. Шехова [19], специально разработанным для взятия проб гидрофитов в лиманах. Укосы взвешивали в сыром и в воздушно-сухом состоянии (весы: V12P6, d-1,0 g; Vibra SJ-420, d-0,01 g). На станциях определяли глубину, прозрачность воды, биомассу растений общую и доминирующих видов.

В своей работе мы использовали классификацию водной растительности и ботанические понятия, изложенные в работах В.Г. Папченкова, А.В. Щербакова, А.Г. Лапирова [2, 20, 21], а для определения видовой принадлежности водной растительности — определители А.С. Зернова и М.М. Голлербаха [22, 23]

Статистический анализ выполнен с помощью программы PAST 4.6.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Согласно нашим исследованиям, уровень воды в Челбасской группе лиманов подвержен выраженным колебаниям в годовом и сезонном аспектах (таблица).

Максимальный уровень воды в лиманах обычно отмечается в апреле – начале июня; начиная с

Средние глубины лиманов Челбасской группы (метры)
Average depths of the limans of the Chelbas group (meters)

Год Year	Сезон Season	Л. Кущеватый Kuschevaty L.	Л. Горький Gorkiy L.	Л. Сладкий Sladkiy L.
2021	Весна Spring	0,96	1,48	1,84
	Лето Summer	0,93	1,43	1,82
2020	Весна Spring	0,86	1,24	1,64
	Лето Summer	0,56	1,07	1,48
	Осень Autumn	0,21	0,74	1,30
2019	Лето Summer		1,40	1,76
2018	Лето Summer	0,90	1,42	1,78

конца июня он постепенно снижается. Минимальные глубины в лиманах наблюдаются в осенне-зимний период.

Анализ космических снимков Челбасских лиманов, сделанных в конце мая, показал, что акватория, соответствующая 0 классу зарастания, за редким исключением была свободна от растительности и в большей степени соответствовала натурным съемкам в сравнении с данными, полученными в летний период. В летний период часть растительности опустилась на глубину и не выявлялась на спутниковых снимках.

1 класс зарастания представлен макроскопическими водорослями и погруженными укореняющимися гидрофитами. Обнаружение таких растений по космоснимкам возможно, если они находятся на расстоянии не более 50 см от поверхности воды, при прозрачности воды не менее 80 см.

2 класс зарастания был представлен также макроскопическими водорослями и укореняющимися гидрофитами, которые располагались у самой поверхности воды.

3 класс зарастания представлен преимущественно высокотравным гелофитом — тростником; при значительном снижении уровня воды в лиманах в этот класс попадают и гидрофиты, которые оказываются на поверхности воды.

Изменения зарастания лиманов Кущеватый и Горький, оцененные по индексу NDVI за период

2016–2021 гг., показаны на рис. 2. В этот период площадь зарастания водной растительностью в лимане Кущеватый колебалась от 93,2 % (2017 г.) до 15 % (2021 г.), в лимане Горький — от 65 % (2020 г.) до 11,9 % (2021 г.). Следует отметить, что уровень зарастания более мелководного лимана Кущеватый выше, чем лимана Горький. Акватория наиболее глубоководного лимана Сладкий была практически свободна от растительности — величина зарастания лимана в 2016–2020 гг. находилась в пределах 1,7–2,7 %.

Визуальные наблюдения показали, что по спутниковым снимкам при использовании водного индекса MNDWI тростник южный (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud) в весенний период определяется как земля, так как с высоты спутника видны только его серо-песочные прошлогодние стебли и метелки. Летом тростник южный становится зеленым и попадает в 3 класс NDVI; по нашим данным, при значительном снижении уровня воды в этот класс попадают и гидрофиты. Поэтому для определения площади зарастания Челбасских лиманов тростником южным впервые использован водный индекс MNDWI, так как изучение спутниковых снимков в сезонной динамике позволяет разделить площадь зарастания водоемов тростником южным и гидрофитами. Выяснено, что площадь зарастания Челбасских лиманов тростником южным невысокая, но она постепенно увеличивается:

так, в 2016 г. зарастание тростником южным лимана Кущеватый составляло 1,4 % от площади общей акватории, в 2021 г. — 4,2 %, в лимане Горький за этот же период площадь увеличилась с 1,3 до 2,7 %, а в лимане Сладкий — с 0,1 до 1,0 %.

В весенний период по спутниковым данным можно обнаруживать погруженную растительность, расположенную на большей глубине, чем в летний. Весной глубина обнаружения водной растительности составляла 50 см, летом — не более 30 см. Площадь зарастания макрофитами, определенная по индексу NDVI, в конце весны 2020 г. в Кущеватом была выше на 9,9 %, в Горьком — на 8,2 % по сравнению с летним периодом. Летом,

вследствие снижения уровня воды, по сравнению с весной гидрофиты оказались ближе к поверхности (или даже на поверхности воды) и в результате лучше выявились при обработке спутниковых снимков. Поэтому для обоих лиманов существенно изменилось соотношение площадей классов зарастания (рис. 3–5): площадь 1 класса зарастания в лимане Кущеватый уменьшилась в 2,4 раза, в лимане Горький — в 1,9 раз; площадь 3 класса зарастания в лимане Кущеватый увеличилась в 3,8 раз, в лимане Горький — в 3,2 раза. В маловодном 2020 г. в летний сезон отмечена самая большая площадь 3 класса зарастания за исследованный нами период, что наглядно представлено на рис. 2 и 3.



Рис. 2. Соотношение площадей классов зарастания в летний период 2016–2021 гг.

Fig. 2. Proportion of the overgrown areas of different classes in the summer seasons of 2016–2021

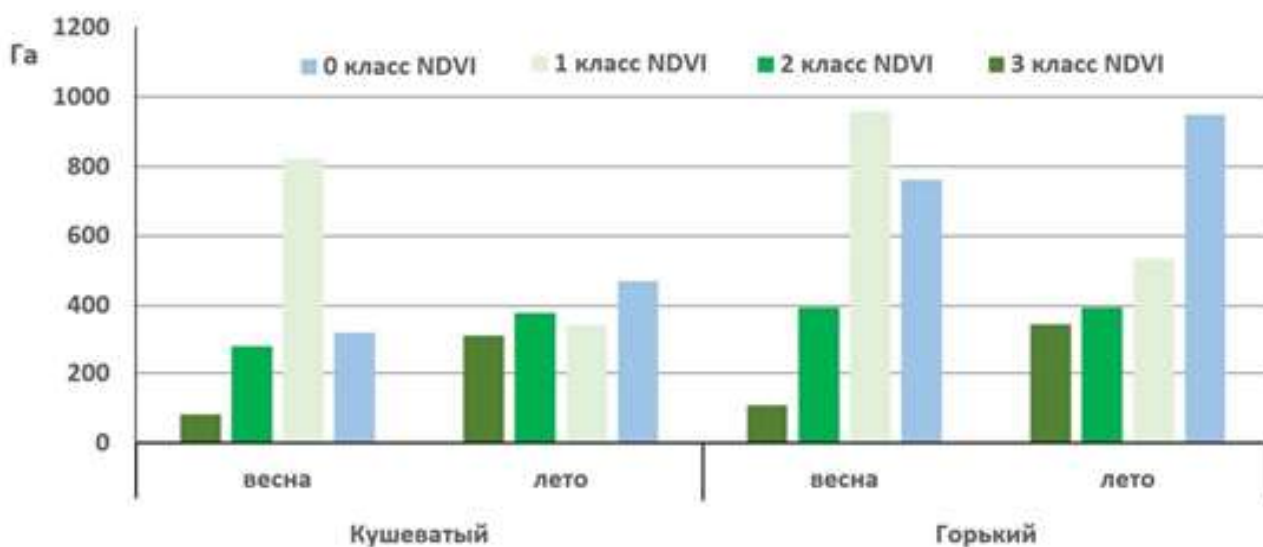


Рис. 3. Площадь классов зарастания в 2020 г. в лиманах Кущеватый и Горький

Fig. 3. Overgrown areas of different classes in the Kushchevaty and Gorkiy Limans in 2020

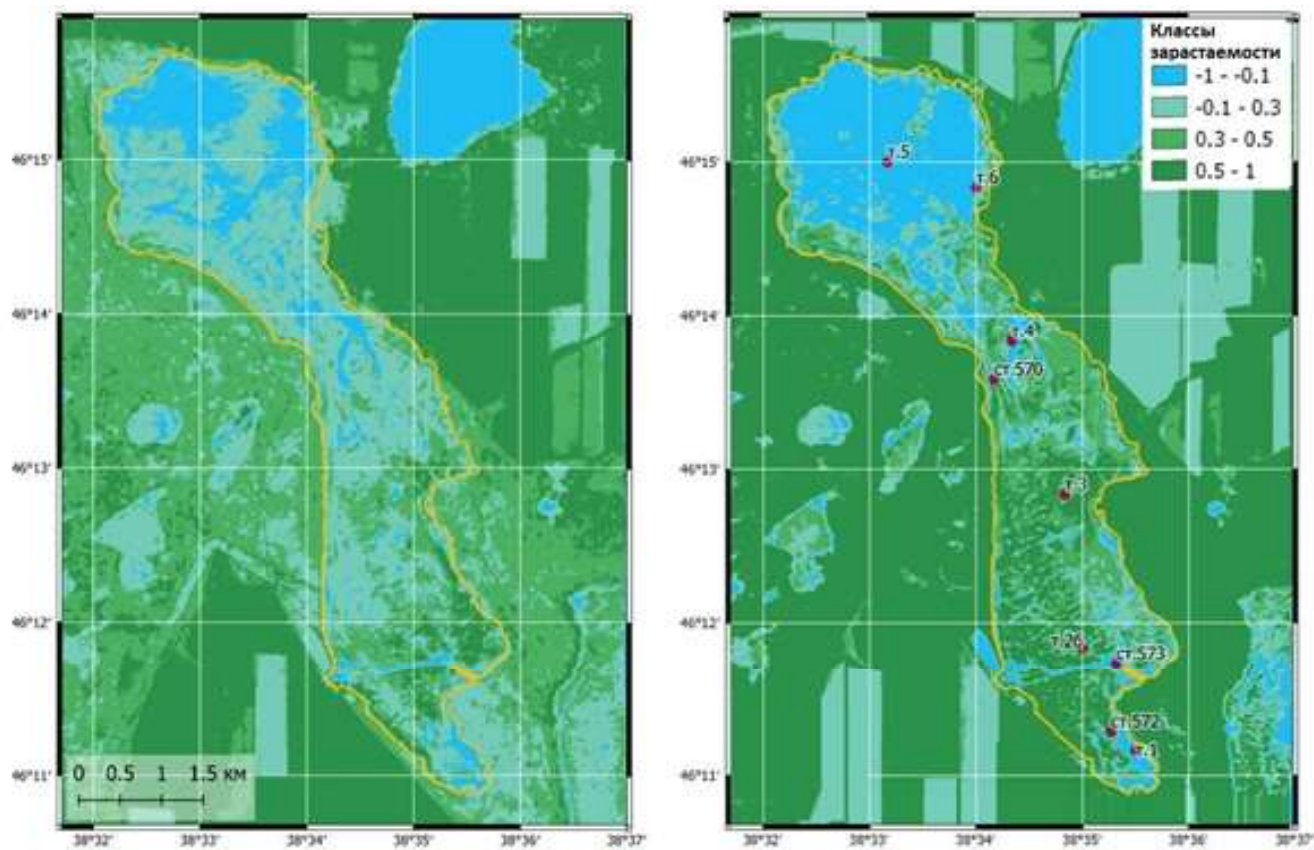


Рис. 4. Пространственное распределение классов зарастания в лимане Кушеватый весной и летом 2020 г.

Fig. 4. Spatial distribution of the overgrowth classes in the Kushchevaty Liman in the spring and summer seasons of 2020

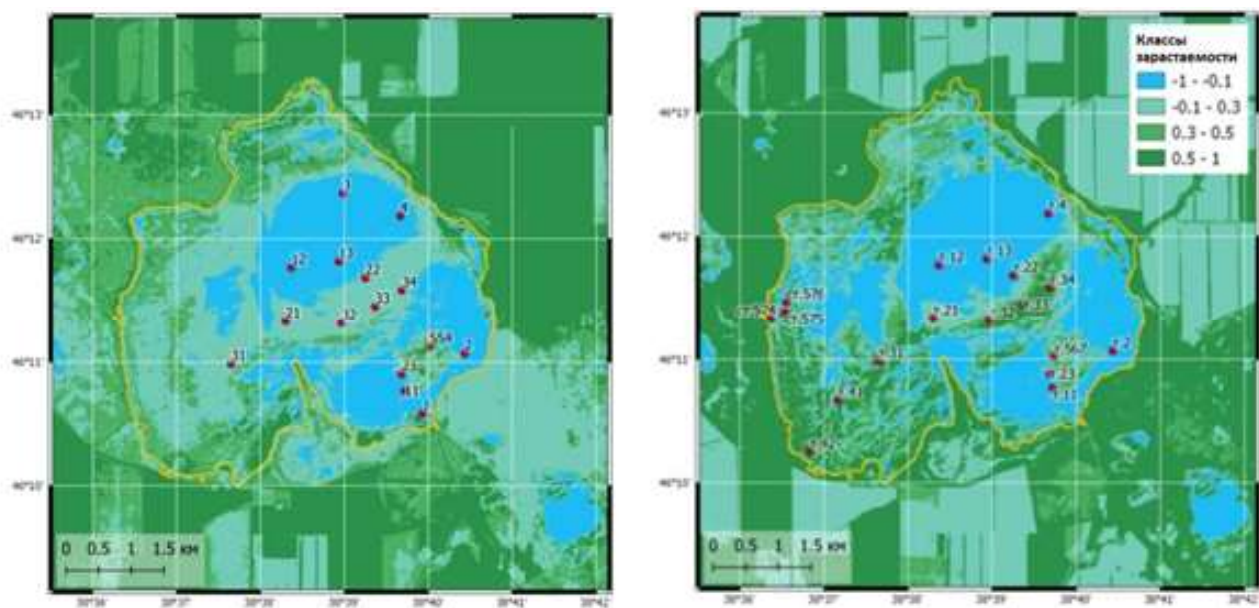


Рис. 5. Пространственное распределение классов зарастания в лимане Горький весной и летом 2020 г.

Fig. 5. Spatial distribution of the overgrowth classes in the Gorkiy Liman in the spring and summer seasons of 2020

Ботанические исследования и визуальные наблюдения 2020 г. показали, что в лимане Кушчеватый по площади зарастания доминирует хара ломкая — *Chara fragilis* Desv. (более 95 %), зарастание тростником южным составляет около 4,1 %, а другие водные растения (роголистники, рдесты и др.) встречаются в небольших количествах. Средняя сырая биомасса хары ломкой на станциях исследования в летний период колебалась в пределах 590–6350 г/м². В среднем сырая биомасса гидрофитов в лимане на станциях отбора проб составила 3070 г/м², воздушно-сухая — 433 г/м²; 99 % из этого числа приходилось на хару ломкую.

В лимане Горький в весенних пробах растительности отмечено 5 видов гидрофитов: хара мелкошиповатая — *Chara aculeolata* Kütz. и хара ломкая — *Chara fragilis* Desv. (встречаемость харовых водорослей — 100 %), улотрикс поясной — *Ulothrix zonata* (Web. et Mohr) Kütz. (встречаемость 44,4 %), рдест гребенчатый — *Stuckenia pectinata* L. (встречаемость 11,1 %), роголистник темно-зеленый — *Ceratophyllum demersum* L. (встречаемость 11,1 %). Средняя сырая биомасса растительности на станциях составила 7300 г/м²; по биомассе доминировали харовые водоросли — на их долю приходилось 82,8 %. В летний период реже встречался улотрикс

поясной (встречаемость 10 %), как и весной, доминировали харовые водоросли (встречаемость 100 %). Средняя сырая биомасса растительности составила 7360 г/м², воздушно-сухая — 986 г/м²; по биомассе доминировали харовые водоросли — на их долю приходилось 98,0 % от общей биомассы гидрофитов.

Акватория лимана Сладкий была практически свободна от растительности: судя по космическим снимкам, зарастание гидрофитами не превышало 1,7 %. На мелководных местах нами отмечены небольшие куртины рдеста гребенчатого, сырая биомасса которого составляла 2300 г/м².

Однофакторный дисперсионный анализ показал, что в летний период 2020 г. существовала статистически достоверная связь ($F=6,9917$, $p=0,00074$) биомассы гидрофитов и класса зарастания, определенного по вегетационному индексу NDVI. Данная взаимосвязь не является линейной — максимальная биомасса отмечается для 2-го класса зарастания (рис. 6). Более низкую фитомассу гидрофитов в третьем классе зарастания можно объяснить тем, что в этот класс попадают растения, которые при резком снижении уровня воды летом оказываются на поверхности воды, но их размеры и, соответственно, биомасса при этом не увеличиваются.

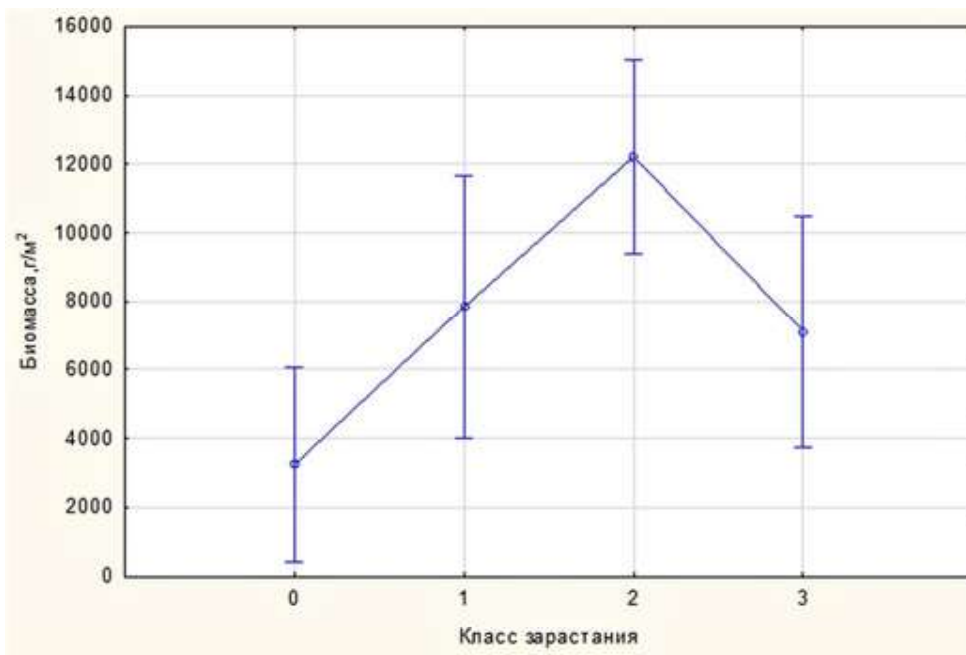


Рис. 6. Средние значения биомассы (г/м²) для разных классов зарастания летом 2020 г. Вертикальными отрезками обозначены доверительные интервалы для уровня значимости $p=0,05$

Fig. 6. Average values of biomass (g/m²) for different classes of overgrowth in the summer season of 2020. Vertical segments indicate confidence intervals for the significance level $p=0,05$

В 2021 г. произошло резкое снижение зарастания лиманов Кущеватый и Горький; согласно спутниковым снимкам, площадь зарастания макрофитами составляла 8,4–9,6 %. Снижение процента зарастания связано с высоким уровнем воды в 2021 г. Большое влияние на этот процесс оказала засуха 2020 г., вследствие которой в осенне-зимний период пересохла межлиманные гирлы, в лиманы перестала поступать пресная вода, они сильно обмелели, а через открытое Челбасское гирло зашла соленая вода. В результате в мае 2021 г. соленость в лимане Кущеватый достигла 11,81 ‰, в Горьком — 4,86 ‰, Сладком — 1,23 ‰ (данные лаборатории гидрохимии АзНИИРХ). Известно, что в результате повышения солености уменьшается площадь зарастания и фитомасса гидрофитов.

В АзНИИРХ был разработан экологический способ борьбы с растительностью — «соленое летование», который заключался в откачке пресной воды, заполнении лиманов морской водой и доведении солености до 12 ‰; в результате «соленого летования» за два года лиманы очищаются от гидрофитов [5].

Челбасская группа лиманов служит нерестилищами для полупроходных рыб. Чрезмерная степень зарастания ухудшает состояние нерестовых миграционных путей, приводит к сокращению площади нерестилищ и нагула промысловых видов рыб. Исследования водной растительности Челбасских лиманов по космическим снимкам показали значительные изменения площади зарастания в лиманах Горький и Кущеватый в зависимости от их обеспеченности пресной водой. Степень зарастания водоемов в конце июня – начале июля, согласно классификации В.Г. Папченкова [3], в период 2017–2021 гг. в лимане Кущеватый изменялась от 7 класса (очень сильно заросший водоем) до 4 класса (умеренно заросший), в лимане Горький — от 6 класса (сильно заросший) до 4 класса (умеренно заросший). Изменения по степени зарастания лимана Сладкий были незначительными; его можно отнести ко 2 классу (очень слабо заросший водоем). Анализ спутниковых снимков показал значительные сезонные изменения как открытой поверхности лиманов, так и значений индекса NDVI. Это связано, в первую очередь, с обеспеченностью пресной водой, а также с фазой вегетации водной растительности и прозрачностью воды, которые зависят от погодных условий. Мы согласны с мнением А.В. Антоненко, А.В. Погорелова

и Ю.Б. Елецкого [18], что сезонные изменения значений вегетационного индекса могут являться дополнительным дешифровочным признаком разных типов водной растительности, имеющей определенные фазы вегетационного развития, однако это возможно только в водоемах со стабильным гидрологическим режимом, так как под воздействием изменения уровня воды также происходит изменение класса NDVI. Поэтому для определения фактической площади зарастания водоема необходимо использовать несколько спутниковых снимков, сделанных в различные периоды вегетации водной растительности.

Изучение площади зарастания в лиманах доминирующими классами формаций растительности и фитомассы гидрофитов необходимо при определении рыбохозяйственного значения водоемов: в малозаросших лиманах с небольшой прозрачностью предпочитает нереститься судак, в заросших водоемах с доминированием рдестов — тарань, а харово-роголистниковые лиманы используются таранью в меньшей степени [1]. Средняя фитомасса гидрофитов в лиманах Горький и Кущеватый летом 2020 г. составила 5608 г/м², из них на долю харовых водорослей приходилось 98,8 %. Известно, что для фитофила тарани фитомасса гидрофитов не должна превышать 3000 г/м² [1]. Согласно фитоценотической классификации А.Г. Шехова [5], данные лиманы до 2021 г. относились к пятому типу лиманов — харово-роголистниковым, переходным от лиманов, пригодных для размножения тарани, к плавневым, непригодным для ее размножения. В 2021 г. произошла «естественная мелиорация» водоемов, имеющая важное рыбохозяйственное значение. С целью восстановления нерестилищ полупроходных рыб в Челбасской группе лиманов необходимо перекрыть 4 «прорана», образовавшиеся в водозащитном валу как искусственным, так и естественным путем и разделяющие восточную и западную подгруппы (см. рис. 1). Это позволит избежать потери воды не только в Кущеватом, но и Горьком лиманах, положительно скажется на миграции производителей и скате молоди полупроходных рыб, а в дальнейшем даст возможность избежать чрезмерной степени зарастания макрофитами.

ВЫВОДЫ

В последние десятилетия в большинстве азовских лиманов сокращаются нерестовые площади

полупроходных рыб и увеличиваются площади плавней, поэтому необходимо проводить постоянный мониторинг зарастания водной растительностью с целью оптимизации фитомассы гидрофитов. Мы подтвердили данные других ученых о возможности использования индекса NDVI для оценки зарастания водной растительностью. Вегетационный индекс мы планируем использовать в дальнейшей работе для классификации зарастания водоемов с целью оперативного определения необходимости проведения в них мелиоративных работ. Впервые водный индекс MNDWI использован для определения площади зарастания лиманов тростником южным. В сравнении с другими азовскими лиманами, обследованные Челбасские лиманы имеют небольшую площадь зарастания — 1,0–4,2 % от акватории лиманов.

Зарастание водной растительностью Челбасской группы азовских лиманов зависит от режима поступления пресной и морской воды. Максимальная площадь зарастания гидрофитами отмечена в 2017 г. в лимане Кушеватый — 93,3 %, Горьком в 2020 г. — 65,0 %. Повышение уровня воды и солености в 2021 г. способствовало уменьшению площади зарастания лиманов гидрофитами в лиманах Кушеватый и Горький до 8,4–9,6 % от общей акватории. В современный период необходимо продолжить мониторинг зарастания гидрофитами нерестилищ полупроходных рыб.

Достоверность интерпретации спутниковых снимков зарастания азовских лиманов водной растительностью повысится при накоплении большего объема научных данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Цуникова Е.П. Водоемы Восточного Приазовья — рыбохозяйственное значение и оптимизация их использования. Ростов-н/Д.: Медиаполис, 2006. 225 с.
2. Лапиров А.Г. Экологические группы растений водоемов // Гидробиотика: методология, методы : матер. Школы по гидробиотике (п. Борок, 8–12 апреля 2003 г.). Рыбинск: Изд-во Института биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина, Рыбинский Дом печати, 2003. С. 5–26.
3. Папченков В.Г. Доминанто-детерминантная классификация водной растительности // Гидробиотика: методология, методы : матер. Школы по гидробиотике (п. Борок, 8–12 апреля 2003 г.). Рыбинск: Изд-во Института биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина, Рыбинский Дом печати, 2003. С. 126–131.
4. Nahirnick N.K., Reshitnyk L., Campbell M., Hessing-Lewis M., Costa M., Yakimishyn J., Lee L. Mapping with confidence; delineating seagrass habitats using Unoccupied Aerial Systems (UAS) // Remote Sensing in Ecology and Conservation. 2019. Vol. 5, issue 2. Pp. 121–135. doi: 10.1002/rse2.98.
5. Шехов А.Г. Растительность Кубанских лиманов : автореф. дис. канд. биол. наук. Ростов-н/Д., 1971. 24 с.
6. Al Sghair F.G. Remote sensing and GIS for wetland vegetation study : Doctor's (Philosophy) Thesis. Glasgow: Institute of Biodiversity, Animal Health and Comparative Medicine College of Medical, Veterinary and Life Sciences Publ., University of Glasgow Publ., 2013. 281 p.
7. Solovey T. Flooded wetlands mapping from Sentinel-2 imagery with spectral water index: a case study of Kampinos National Park in central Poland // Geological Quarterly. 2020. Vol. 64, no. 2. Pp. 492–505. doi: 10.7306/gq.1509.
8. Coastal and inland aquatic data products for the hyperspectral infrared imager (HyspIRI). White paper report by the HyspIRI Aquatic Studies Group (HASG). 26 February 2015. K. Turpie (Ed.). Greenbelt, Maryland: National Aeronautics and Space Administration. Goddard Space Flight Center Publ., 2015. 116 p.
9. Люштык В.С., Ежова О.С., Милько А.Ч., Шукейло О.В., Новиков А.А., Сипач В.А. Базы геоданных биоразнообразия флоры национального парка «Нарочанский» // Проблемы сохранения биологического разнообразия и использования биологических ресурсов : матер. III Междунар. науч.-практ. конф., посвященной 110-летию со дня рождения академика Н.В. Смольского (г. Минск, 7–9 октября 2015 г.). Минск: Конфидо, 2015. Т. 1. С. 126–129.
10. Погорелов А.В., Липилин Д.А., Курносова А.С. Спутниковый мониторинг Краснодарского водохранилища // Географический вестник. 2017. № 1 (40). С. 130–137. doi: 10.17072/2079-7877-2017-1-130-137.
11. Yadav S., Yoneda M., Susaki J., Tamura M., Ishikawa K., Yamashiki Y. A satellite-based assessment of the distribution and biomass of submerged aquatic vegetation in the optically shallow basin of Lake Biwa // Remote Sensing. 2017. Vol. 9, issue 9. e966. doi: 10.3390/rs9090966.
12. Антоненко М.В. Спутниковый мониторинг Куликово-Курчанской группы лиманов // Тридцать третье пленарное межвузовское координационное совещание по проблеме эрозийных, русловых и устьевых процессов (г. Нижневартовск, 2–4 октября 2018 г.) : доклады и краткие сообщения. Нижневартовск: Изд-во Нижневартовского государственного университета, 2018. С. 59–61.
13. Кочеткова А.И., Брызгалина Е.С., Калюжная И.Ю., Сиротина Л.С., Самотеева В.В., Ракшенко Е.П.

- Динамика зарастания Цимлянского водохранилища // Принципы экологии. 2018. Т. 7, № 1. С. 60–72. doi: 10.15393/j1.art.2018.7202.
14. Chen Q., Yu R., Hao Y., Wu L., Zhang W., Zhang Q., Bu X. A new method for mapping aquatic vegetation especially underwater vegetation in Lake Ulansuhai using GF-1 satellite data // *Remote Sensing*. 2018. Vol. 10, issue 8. e1279. doi: 10.3390/rs10081279.
 15. Власов Б.П., Грищенко Н.Д., Сивенков А.Ю. Геоэкологическая информативность данных дистанционного зондирования Земли при изучении высшей водной растительности // Современное состояние и перспективы развития особо охраняемых природных территорий (ООПТ) : сб. науч. статей. Минск, 2019. С. 254–258.
 16. Михайлова К.Б., Михалап С.Г. Многолетняя динамика площади зарастания гелофитной растительностью Псковского озера // Трансформация экосистем. 2019. Т. 2, № 1. С. 86–93. doi: 10.23859/estr180711.
 17. Сипач В.А., Новиков А.А., Семенов О.А. Картирование водной растительности озер Национального парка «Нарочанский» с использованием ГИСТехнологий // Сахаровские чтения 2019 года: экологические проблемы XXI века : матер. XIX Междунар. науч. конф. (г. Минск, 23–24 мая 2019 г.) / Под ред. С.А. Маскевича, С.С. Позняка. Минск: Изд-во Информационно-вычислительного центра Министерства финансов Республики Беларусь, 2019. Ч. 3. С. 337–340.
 18. Антоненко М.В., Погорелов А.В., Елецкий Ю.Б. Мониторинг Куликово-Курчанской группы лиманов (дельта реки Кубани) в районе лицензионного участка ООО НК «ПРИАЗОВНЕФТЬ» // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2015. № 11. С. 55–63.
 19. Шехов А.Г. Прибор для взятия проб водной растительности // Ботанический журнал. 1971. Т. 56, № 2. С. 254–257.
 20. Папченков В.Г. Доминантно-детерминантная классификация водной растительности // Гидробиотаника: методология, методы : матер. Школы по гидробиотанике (п. Борок, 8–12 апреля 2003 г.). Рыбинск: Изд-во Института биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина, Рыбинский Дом печати, 2003. С. 126–131.
 21. Папченков В.Г., Щербаков А.В., Лапиров А.Г. Основные гидробиотанические понятия и сопутствующие им термины // Гидробиотаника: методология, методы : матер. Школы по гидробиотанике (п. Борок, 8–12 апреля 2003 г.). Рыбинск: Изд-во Института биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина, Рыбинский Дом печати, 2003. С. 27–37.
 22. Зернов А.С. Иллюстрированная флора юга Российского Причерноморья. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2013. 592 с.
 23. Определитель пресноводных водорослей СССР. Вып. 14. Харовые водоросли / Под ред. М.М. Голлербах, Л.К. Красавиной. Л.: Наука, 1983. 190 с.

REFERENCES

1. Tsunikova E.P. Vodoemy Vostochnogo Priazov'ya — rybokhozyaystvennoe znachenie i optimizatsiya ikh ispol'zovaniya [Water bodies of the Eastern Azov Region: their fishery significance and optimization of their practical use]. Rostov-on-Don: Mediapolis, 2006, 225 p. (In Russian).
2. Lapirova A.G. Ekologicheskie gruppy rasteniy vodoemov [Ecological groups of the vegetation in water bodies]. In: *Gidrobotanika: metodologiya, metody : materialy Shkoly po gidrobotanike (p. Borok, 8–12 aprelya 2003 g.)* [Hydrobotanics: methodology, methods. Proceedings of the training course on the hydrobotanics (Borok, 8–12 April, 2003)]. Rybinsk: Institut biologii vnutrennikh vod im. I.D. Papanina [Papanin Institute for Biology of Inland Waters, Russian Academy of Sciences] Publ., Rybinskiy Dom pechati [Rybinsk Publishing House], 2003, pp. 5–26. (In Russian).
3. Papchenkov V.G. Kartirovanie rastitel'nykh vodoemov i vodotokov [Mapping the vegetation of waterbodies and watercourses]. In: *Gidrobotanika: metodologiya, metody : materialy Shkoly po gidrobotanike (p. Borok, 8–12 aprelya 2003 g.)* [Hydrobotanics: methodology, methods. Proceedings of the training course on the hydrobotanics (Borok, 8–12 April, 2003)]. Rybinsk: Institut biologii vnutrennikh vod im. I.D. Papanina [Papanin Institute for Biology of Inland Waters, Russian Academy of Sciences] Publ., Rybinskiy Dom pechati [Rybinsk Publishing House], 2003, pp. 132–136. (In Russian).
4. Nahirnicky N.K., Reshitnyk L., Campbell M., Hessel-Lewis M., Costa M., Yakimishyn J., Lee L. Mapping with confidence; delineating seagrass habitats using Unoccupied Aerial Systems (UAS). *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 2019, vol. 5, issue 2, pp. 121–135. doi: 10.1002/rse2.98.
5. Shekhov A.G. Rastitel'nost' Kubanskikh limanov : avtoref. dis. kand. biol. nauk [Vegetation of the Kuban Limans. Extended abstract of Candidate's (Biology) Thesis]. Rostov-on-Don, 1971, 24 p. (In Russian).
6. Al Sghair F.G. Remote sensing and GIS for wetland vegetation study. Doctor's (Philosophy) Thesis. Glasgow: Institute of Biodiversity, Animal Health and Comparative Medicine College of Medical, Veterinary and Life Sciences Publ., University of Glasgow Publ., 2013, 281 p.
7. Solovey T. Flooded wetlands mapping from Sentinel-2 imagery with spectral water index: a case study of Kampinos National Park in central Poland. *Geological Quarterly*, 2020, vol. 64, no. 2, pp. 492–505. doi: 10.7306/gq.1509.

8. Coastal and inland aquatic data products for the hyperspectral infrared imager (HypSIRI). White paper report by the HypSIRI Aquatic Studies Group (HASG). 26 February 2015. K. Turpie (Ed.). Greenbelt, Maryland: National Aeronautics and Space Administration. Goddard Space Flight Center Publ., 2015. 116 p.
9. Lyushtyk V.S., Ezhova O.S., Milko A.Ch., Shukeylo O.V., Novikov A.A., Sipach V.A. Bazy geodannykh bioraznoobraziya flory natsional'nogo parka "Narochanskiy" [Creating a geodatabase biodiversity of flora of the National Park "Naroch"]. In: *Problemy sokhraneniya biologicheskogo raznoobraziya i ispol'zovaniya biologicheskikh resursov : materialy III Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 110-letiyu so dnya rozhdeniya akademika N.V. Smol'skogo (g. Minsk, 7–9 oktyabrya 2015 g.)* [Issues of the biological diversity conservation and the exploitation of biological resources. Proceedings of the 3rd International Research and Practice Conference, dedicated to the 110th Anniversary of the academician N.V. Smolsky (Minsk, 7–9 October, 2015)]. Minsk: Konfido [Confido], 2015, vol. 1, pp. 126–129. (In Russian).
10. Pogorelov A.V., Lipilin D.A., Kurnosova A.S. Sputnikovyy monitoring Krasnodarskogo vodokhranilishcha [Satellite monitoring of the Krasnodar Reservoir]. *Geograficheskiy vestnik* [Geographical Bulletin], 2017, no. 1 (40), pp. 130–137. doi: 10.17072/2079-7877-2017-1-130-137. (In Russian).
11. Yadav S., Yoneda M., Susaki J., Tamura M., Ishikawa K., Yamashiki Y. A satellite-based assessment of the distribution and biomass of submerged aquatic vegetation in the optically shallow basin of Lake Biwa. *Remote Sensing*, 2017, vol. 9, issue 9, e966. doi: 10.3390/rs9090966.
12. Antonenko M.V. Sputnikovyy monitoring Kulikovo-Kurchanskoy gruppy limanov [Satellite monitoring of the Kulikov-Kurchansk group of limans]. In: *Tridtsat' tret'e plenarnoe mezhvuzovskoe koordinatsionnoe soveshchanie po probleme erozionnykh, ruslovykh i ust'evykh protsessov (g. Nizhnevartovsk, 2–4 oktyabrya 2018 g.) : doklady i kratkie soobshcheniya* [Thirty-third collegiate coordination interplenary meeting on the issue of erosion, fluviomorphological and estuarine processes (Nizhnevartovsk, 2–4 October, 2018). Reports and brief communications]. Nizhnevartovsk: Nizhnevartovskiy gosudarstvennyy universitet [Nizhnevartovsk State University] Publ., 2018, pp. 59–61. (In Russian).
13. Kochetkova A.I., Bryzgalina E.S., Kalyuzhnaya I.Yu., Sirotnina L.S., Samoteeva V.V., Rakshenko E.P. Dinamika zarastaniya Tsimlyanskogo vodokhranilishcha [Overgrowth dynamics of the Tsimlyanskoe Reservoir]. *Printsipy ekologii* [Principles of the Ecology], 2018, vol. 7, no. 1, pp. 60–72. doi: 10.15393/j1.art.2018.7202.
14. Chen Q., Yu R., Hao Y., Wu L., Zhang W., Zhang Q., Bu X. A new method for mapping aquatic vegetation especially underwater vegetation in Lake Ulansuhai using GF-1 satellite data. *Remote Sensing*, 2018, vol. 10, issue 8, e1279. doi: 10.3390/rs10081279.
15. Vlasov B.P., Grishchenkova N.D., Sivenkov A.Yu. Geoekologicheskaya informativnost' dannykh distantsionnogo zondirovaniya Zemli pri izuchenii vysshey vodnoy rastitel'nosti [Geoecological information value of the data collected using remote sensing in the course of investigation of higher aquatic vegetation]. In: *Sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya osobo okhranyaemykh prirodnykh territoriy (OOPT) : sbornik nauchnykh statey* [Current state and prospects for the development of specially protected natural areas (SPNA). Collected research papers]. Minsk, 2019, pp. 254–258. (In Russian).
16. Mikhaylova K.B., Mikhlap S.G. Mnogoletnyaya dinamika ploshchadi zarastaniya gelofitnoy rastitel'nost'yu Pskovskogo ozera [Long-term dynamics of the area overgrown by helophytic vegetation in Lake Pskov]. *Transformatsiya ekosistem* [Ecosystem Transformation], 2019, vol. 2, no. 1, pp. 86–93. doi: 10.23859/estr180711. (In Russian).
17. Sipach V.A., Novikov A.A., Semenov O.A. Kartirovanie vodnoy rastitel'nosti ozer Natsional'nogo parka "Narochanskiy" s ispol'zovaniem GIS-tehnologiy [Mapping the lakes' aquatic vegetation of the National Park "Narochanskiy" using GIS technologies]. In: *Sakharovskie chteniya 2019 goda: ekologicheskie problemy XXI veka : materialy XIX Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii (g. Minsk, 23–24 maya 2019 g.)* [Sakharov Readings 2019: Environmental problems of the XXI century. Proceedings of the 19th International Scientific Conference (Minsk, 23–24 May, 2019)]. S.A. Maskevich, S.S. Poznyak (Eds.). Minsk: Informatsionno-vychislitel'nyy tsentr Ministerstva finansov Respubliki Belarus' [Information and Computing Center of the Ministry of Finance of the Republic of Belarus] Publ., 2019, part 3, pp. 337–340. (In Russian).
18. Antonenko M.V., Pogorelov A.V., Eletskiy Yu.B. Monitoring Kulikovo-Kurchanskoy gruppy limanov (del'ta reki Kubani) v rayone litsenzionnogo uchastka OOO NK "PRIAZOVNEFT" [Monitoring of Kulikovo-Kurchansk estuaries (the Kuban River delta) near the license area of LLC "NK "PRIAZOVNEFT"]. *Zashchita okruzhayushchey sredy v neftegazovom komplekse* [Environmental Protection in Oil and Gas Complex], 2015, no. 11, pp. 55–63. (In Russian).
19. Shekhov A.G. Pribor dlya vzyatiya prob vodnoy rastitel'nosti [Sampling device for aquatic vegetation]. *Botanicheskiy zhurnal* [Botanical Journal], 1971, vol. 56, no. 2, pp. 254–257. (In Russian).
20. Papchenkov V.G. Dominanto-determinantnaya klassifikatsiya vodnoy rastitel'nosti [Dominant-determinant classification of aquatic vegetation]. In: *Gidrobotanika: metodologiya, metody : materialy Shkoly po gidrobotanike (p. Borok, 8–12 aprelya 2003 g.)*

- [*Hydrobotanics: methodology, methods. Proceedings of the training course on the hydrobotanics (Borok, 8–12 April, 2003)*]. Rybinsk: Institut biologii vnutrennikh vod im. I.D. Papanina [Papanin Institute for Biology of Inland Waters, Russian Academy of Sciences] Publ., Rybinskiy Dom pechati [Rybinsk Publishing House], 2003, pp. 126–131. (In Russian).
21. Papchenkov V.G., Shcherbakov A.V., Lapirova A.G. Osnovnye gidrobotanicheskie ponyatiya i soputstvuyushchie im terminy [Basic hydrobotanical concepts and related terms]. In: *Gidrobotanika: metodologiya, metody : materialy Shkoly po gidrobotanike (p. Borok, 8–12 aprelya 2003 g.)* [*Hydrobotanics: methodology, methods. Proceedings of the training course on the hydrobotanics (Borok, 8–12 April, 2003)*]. Rybinsk: Institut biologii vnutrennikh vod im. I.D. Papanina [Papanin Institute for Biology of Inland Waters, Russian Academy of Sciences] Publ., Rybinskiy Dom pechati [Rybinsk Publishing House], 2003, pp. 27–37. (In Russian).
22. Zernov A.S. Ilyustrirovannaya flora yuga Rossiyskogo Prichernomor'ya [Illustrated flora of the Southern stretch of the Russian Black Sea coast]. Moscow: Tovarishestvo nauchnykh izdaniy KMK [KMK Scientific Press Ltd.], 2013, 592 p. (In Russian).
23. Opredelitel' presnovodnykh vodorosley SSSR. Vyp. 14. Kharovye vodorosli [The identification manual of freshwater algae of the USSR. Issue 14. The charophytes—Charophyta]. M.M. Gollerbakh, L.K. Krasavina (Eds.). Leningrad: Nauka [Science], 1983, 190 p. (In Russian).

Поступила 08.10.2021

Принята к печати 26.11.2021