

Дистанционный мониторинг зарастания высшей водной растительностью акватории эвтрофированного водохранилища

© 2020. Т. И. Кутявина¹, к. б. н., с. н. с.,
В. В. Рутман¹, инженер,

Т. Я. Ашихмина^{1,2}, д. т. н., профессор, г. н. с., зав. лабораторией,

¹Вятский государственный университет,

610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,

²Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН,

167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,

e-mail: kutyavinati@gmail.com

В работе представлены сведения о распространении зарослей прибрежно-водных и высших водных растений по акватории Омутнинского водохранилища, подверженного процессам эвтрофирования. При маршрутном обследовании водоёма на разных участках выделено 33 доминирующих вида водных и прибрежно-водных растений. Крупные заросли высших растений зафиксированы на мелководных участках в верховье и на центральном участке водохранилища вдоль береговой линии. Проведено дешифрирование космоснимков со спутников Landsat-5 и Sentinel-2, рассчитан нормализованный вегетационный индекс (NDVI). По результатам расчёта NDVI вычислены площади зарастания акватории Омутнинского водохранилища надводной растительностью. Отмечено уменьшение площадей зарастания высшими водными растениями верховья водоёма в период с 2011 по 2019 гг., что вероятно, связано с влиянием температурного фактора.

Ключевые слова: внутренние воды, эвтрофирование, высшие водные растения, нормализованный вегетационный индекс, дистанционное зондирование Земли.

Remote monitoring of overgrowth of the eutrophied reservoir water area by higher aquatic vegetation

© 2020. T. I. Kutyavina¹ ORCID: 0000-0001-7957-0636[?]

V. V. Rutman¹ ORCID: 0000-0002-9025-3487[?]

T. Ya. Ashikhmina^{1,2} ORCID: 0000-0003-4919-0047[?]

¹Vyatka State University,

36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,

²Institute of Biology of Komi Scientific Centre

of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,

28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,

e-mail: kutyavinati@gmail.com

The paper presents information on the distribution of thickets of coastal aquatic and higher aquatic plants in the water area of the Omutninsky reservoir, subject to eutrophication processes. During the route survey of the reservoir, 33 dominant species of aquatic and coastal aquatic plants were identified. Large thickets of *Equisetum fluviatile* L., *Scirpus lacustris* L., *Persicaria amphibia* (L.) S.F. Gray, *Potamogeton lucens* L., *P. perfoliatus* L. were recorded in shallow areas in the upper reaches and in the central part of the reservoir along the coastline. Interpretation of satellite images from Landsat-5 and Sentinel-2 satellites was carried out, the normalized vegetation index (NDVI) was calculated for the investigated water area. According to the results of the NDVI calculation, the areas of overgrowth of the water area of the Omutninsky reservoir with emergent vegetation were calculated. The data were processed using the QGIS Desktop 3.14.1 with GRASS 7.8.3 program. A tendency was revealed for a decrease in the areas of overgrowth with higher aquatic vegetation in the water area of the Omutninsky reservoir for the period 2011 to 2019, which is most likely associated with the influence of the temperature factor.

Keywords: inland waters, eutrophication, higher aquatic plants, normalized vegetation index, remote sensing of the Earth.

Высшая водная растительность (ВВР) имеет большое значение в регуляции биологических процессов в экосистеме и в самоочищении водоёма [1]. Сообщества макрофитов в значительной степени препятствуют «цветению» воды [2], служат местом нереста и нагула многих фитофильных рыб. Высшие водные растения имеют большое значение в процессах накопления и миграции химических элементов в водных экосистемах [3, 4]. Степень зарастания водоёма может свидетельствовать о трофическом статусе водного объекта, а динамика изменения проективного покрытия – о скорости сукцессии водоёма [5]. Оценку зарастания ВВР водоёмов традиционно проводят с помощью полевых методов исследования [6–8], однако в последние годы увеличилось число работ по изучению особенностей зарастания водоёмов ВВР с помощью дистанционных методов [9–13].

Цель работы – выявить тенденции процесса зарастания высшей водной растительностью акватории Омутнинского водохранилища за период 2011–2019 гг. методами пространственного анализа космических снимков и на основании данных полевых наблюдений.

Объекты и методы исследования

Исследования проводились на акватории Омутнинского водохранилища Кировской области. По положению в географической зоне данное водохранилище является лесным, по приуроченности к макрорельефу – равнинным, по площади водного зеркала (9,5 км²) – небольшим, по объёму (32,5 млн м³) – малым. Согласно классификации качества вод по содержанию растворённого кислорода, биохимического потребления кислорода, перманганатной окисляемости, содержанию фосфатов, неорганических форм азота (ГОСТ 17.1.2.04-77), Омутнинское водохранилище является β-мезосапробным, что по трофической шкале классификации водоёмов соответствует эвтрофному классу [14].

Экспедиционные исследования проводились на акватории Омутнинского водохранилища в летний сезон в 2011, 2014, 2018 и 2019 гг. Во время маршрутного обследования осуществлялось визуальное наблюдение акватории и береговой линии водоёма с фиксированием зарослей высших водных и прибрежно-водных растений. По результатам маршрутного наблюдения в программном продукте MapInfo Professional (версия 8.5) составляли карты-схемы распределения за-

рослей высших водных и прибрежно-водных растений по акватории водоёма.

Участки с зарослями высших растений на водной поверхности также определяли по данным дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). В качестве источника для дешифрирования данных ДЗЗ были задействованы снимки 2011, 2018 и 2019 гг. со спутников Landsat-5 (с разрешением 30 м) и Sentinel-2A (использовали каналы с разрешением 10 м), находящиеся в открытом доступе. Для дешифрирования выбирали малооблачные снимки, сделанные в период с мая по сентябрь, когда большинство водных растений находятся в стадии вегетации. В ходе работы проводили расчёт нормализованного вегетационного индекса (NDVI) [15]. Основным объектом при классификации снимков ДЗЗ были воздушно-водные растения, у которых часть побегов находится в воде, а часть располагается над водной поверхностью. Полностью погруженные в воду растения в процессе дешифрирования не выделялись. Площадь зарастания акватории ВВР определяли визуально на основе результатов вычисления NDVI. Этот индекс был рассчитан на основе каналов В4 и В8 спутника Sentinel-2 по формуле:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

На акватории были выделены участки, на которых значение индекса превышает значение водной поверхности и аналогично показателю растительности на суше. На основе полученных областей был создан векторный слой, состоящий из полигональных объектов. Площади полигонов были рассчитаны автоматически встроенной в геоинформационную систему QGIS функцией расчёта площади, потом просуммированы. Для обработки данных использовали программу QGIS Desktop 3.14.1 with GRASS 7.8.3.

Результаты и обсуждение

По результатам экспедиционных исследований, проведённых сотрудниками научно-исследовательской лаборатории биомониторинга Института биологии Коми НЦ УрО РАН и Вятского государственного гуманитарного университета в июне–августе 2011 г., на разных участках акватории Омутнинского водохранилища было выделено 33 доминирующих вида водных и прибрежно-водных растений. Группы высших растений приведены в соответствии с классификацией А.Г. Лапинова [16].

Таблица / Table

Площадь зарастания прибрежно-водными и высшими водными растениями верховья Омутнинского водохранилища по снимкам со спутников Landsat-5* и Sentinel-2A
The area of coastal aquatic and higher aquatic plants in the upper reaches of the Omutninsky reservoir according to images from the Landsat-5* and Sentinel-2A satellites

Год исследования Research year	2011	2018	2019
Площадь зарастания надводной растительностью, км ² Surface overgrown with emergent vegetation, km ²	0,320*	0,151	0,087
Доля от всей акватории, % Share of the total water area, %	3,37*	1,59	0,92

Из истинно-водных растений (гидрофитов) были отмечены погружённые плавающие в толще воды: *Ceratophyllum demersum* L., *Utricularia vulgaris* L.; погружённые укореняющиеся или прикрепляющиеся: *Elodea canadensis* Michx., *Myriophyllum verticillatum* L., *Potamogeton gramineus* L., *P. perfoliatus* L., *P. lucens* L., *P. compressus* L., *P. obtusifolius* Mert. et Koch, *P. pectinatus* L., *Sparganium* (водная форма); укореняющиеся с плавающими на воде листьями: *Nuphar lutea* (L.) Smith, *Nymphaea candida* J. Presl., *Persicaria amphibia* (L.) S.F. Gray, *Potamogeton natans* L.; и плавающие на поверхности воды: *Hydrocharis morsus-ranae* L., *Lemna trisulca* L., *L. minor* L., *Spirodela polyrhiza* (L.) Schleid.

Из прибрежно-водных растений (гелофитов) отмечены *Typha latifolia* L., *Sparganium emersum* Rehm. (*S. simplex* Huds.), *S. erectum* L. (*S. ramosum* Huds.), *Alisma plantago-aquatica* L., *Sagittaria sagittifolia* L., *Butomus umbellatus* L. Среди растений-гидрофитов (переувлажнённых местообитаний), частично вызывающих зарастание, обнаружены: *Juncus compressus* Jacq., *J. filiformis* L., *Equisetum fluviatile* L., *Carex rhynchophylla* C.A. Mey., *C. rostrata* Stores., *C. disperma* Dew., *C. elongata* L., *C. acuta* L.

Распространение водных растений в Омутнинском водохранилище наблюдается с глубины от 0 до 5–6 м., что является типичным для русловых водохранилищ. Видовой состав ВВР в изучаемом водоёме в 2011 г. соответствовал видовому составу, типичному для мезотрофных и слабоэвтрофных водоёмов. Визуальное изучение акватории водоёма показало, что наибольшее видовое разнообразие ВВР было характерно для мест впадения рек Песчанка и Омутная (рис. 1, 2, см. цв. вкладку). Эти участки отличаются небольшими глубинами (до 1–3 м). Водное зеркало на них чистое, прозрачное, свободное от взвешенных в толще воды водорослей.

Наибольшие по площади заросли отмечены для следующих видов: *Equisetum fluviatile* L.

(рис. 3, см. цв. вкладку), *Scirpus lacustris* L., *Persicaria amphibia* (L.) S.F. Gray (рис. 4, см. цв. вкладку), *Potamogeton lucens* L., *P. perfoliatus* L. Особи практически всех встреченных видов водных и прибрежно-водных растений находились в хорошем жизненном состоянии.

Массовое развитие *Lemna trisulca* L., *L. minor* L., *Spirodela polyrhiza* (L.) Schleid. отмечено на акватории вблизи профилактория, расположенного на берегу в центральной части водохранилища. Известно, что локальное интенсивное развитие рясковых указывает на места поступления биогенных веществ в водоёмы [17]. До 2012 г. на указанном участке осуществлялся выпуск сточных вод профилактория в Омутнинское водохранилище, в 2011 г. в воде было зафиксировано высокое содержание аммонийного азота (в 2 раза выше, чем на остальной акватории) [18].

Согласно расчётам NDVI, площадь зарастания акватории надводной растительностью в верховье водоёма в 2011 г. составляла 0,320 км² (табл.). В зафиксированных на космоснимках зарослях преобладали растения *Scirpus lacustris* L., *Persicaria amphibia* (L.) S.F. Gray и *Equisetum fluviatile* L. (рис. 3, 4). Во время маршрутного обследования водохранилища в его верховье также зафиксированы большие по площади заросли погружённых растений (в основном *Potamogeton perfoliatus* L.).

В ходе экспедиционных исследований в 2014 г. нами отмечено сокращение количества доминирующих видов в Омутнинском водохранилище с 33 до 27. В 2014 г. после прекращения выпуска сточных вод от профилактория в водоём, на центральном участке водохранилища практически отсутствовали *Elodea canadensis* Michx., *Nuphar lutea* (L.) Smith, *Lemna trisulca* L., *L. minor* L., *Spirodela polyrhiza* (L.) Schleid. Уменьшились размеры зарослей ВВР в средней части водохранилища, в районе впадения р. Песчанки, а заросли в верховье пруда, на-

Т. И. Кутявина, В. В. Рутман, Т. Я. Ашихмина
«Дистанционный мониторинг зарастания
высшей водной растительностью
акватории эвтрофированного водохранилища». С. 36.

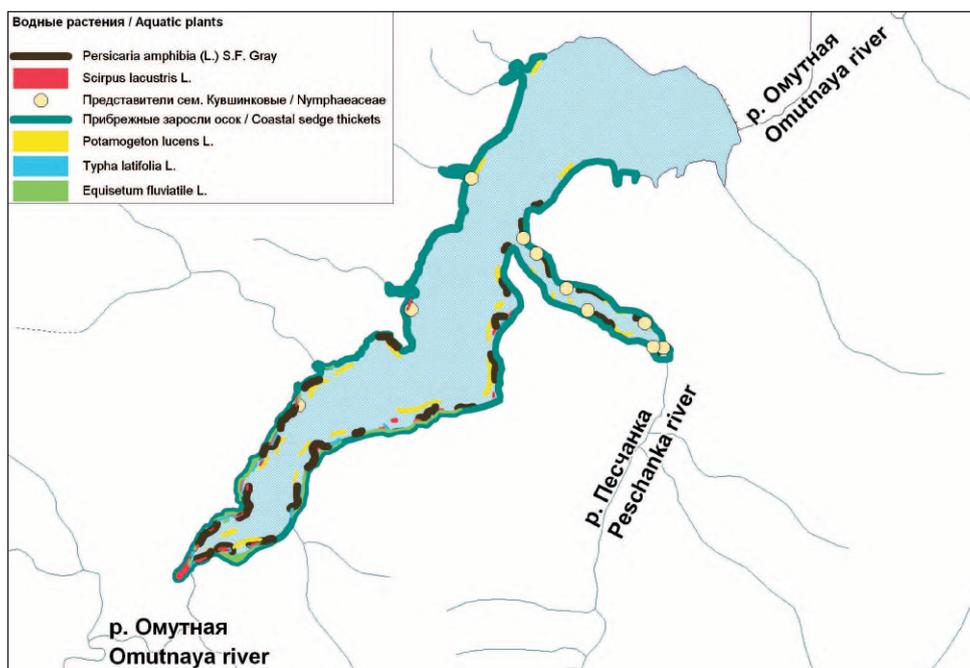
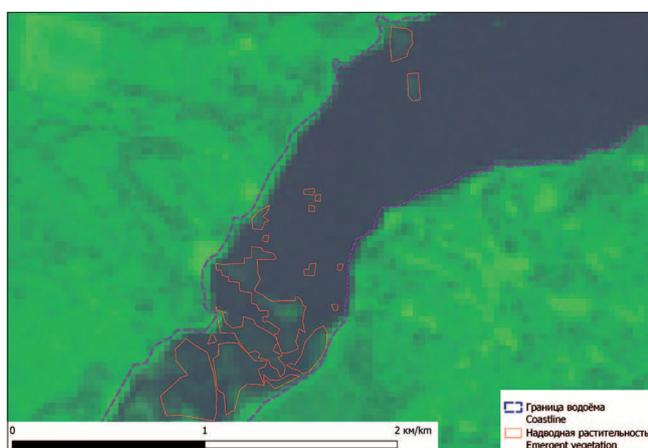
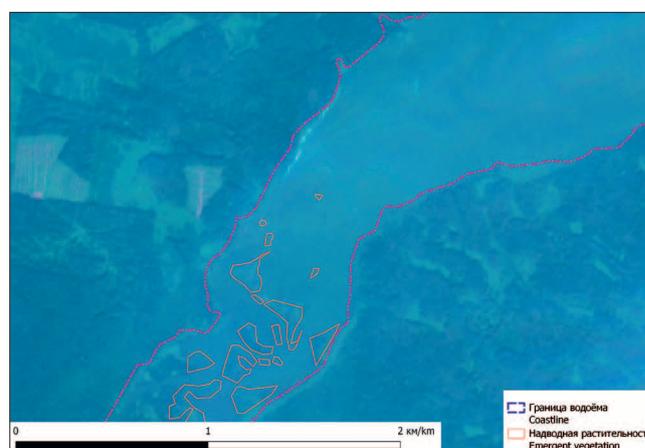


Рис. 1. Карта-схема распределения зарослей высших водных растений по акватории Омутнинского водохранилища в 2011 г.
Fig. 1. Schematic map of the distribution of thickets of higher aquatic plants in the water area of the Omutninsky reservoir in 2011



2011



2018

Рис. 2. Заросли высших водных растений в верховье Омутнинского водохранилища в 2011 и 2018 гг.
Fig. 2. Thickets of higher aquatic plants in the upper reaches of the Omutninsky reservoir in 2011 and 2018

Т. И. Кутявина, В. В. Рутман, Т. Я. Ашихмина
«Дистанционный мониторинг зарастания
вышей водной растительностью
акватории эвтрофированного водохранилища». С. 36.



Рис. 3. Прибрежные заросли хвоща речного в Омутнинском водохранилище (2011 г.)
Fig. 3. Coastal thickets of *Equisetum fluviatile* L. in the Omutninsky reservoir (2011)

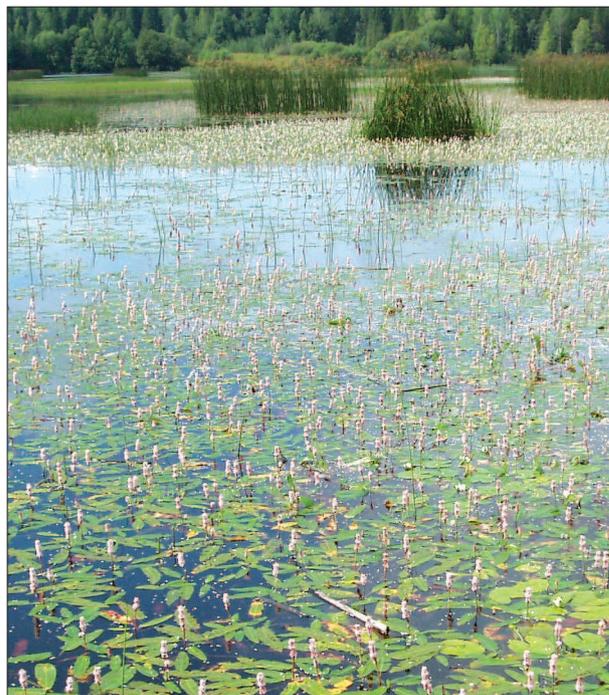


Рис. 4. Горцево-камышовая ассоциация в Омутнинском водохранилище (2011 г.)
Fig. 4. Association of *Persicaria amphibia* (L.) S.F. Gray and *Scirpus lacustris* L. in the Omutninsky reservoir (2011)



Рис. 5. Ассоциация *Persicaria amphibia* (L.) S.F. Gray в Омутнинском водохранилище, 2019 г.
Fig. 5. Association of *Persicaria amphibia* (L.) S.F. Gray in the Omutninsky reservoir (2019)

оборот, стали обширнее. По всей акватории реже стали встречаться представители семейства Кувшинковые (Нимфейные). В связи с отсутствием пригодных для дешифрирования снимков в июле 2014 г., расчёт NDVI в этот год исследования не проводили. По визуальным наблюдениям, общая площадь зарастания акватории водохранилища по сравнению с 2011 г. изменилась незначительно.

Следующее маршрутное обследование Омутнинского водохранилища было выполнено в 2018 г. По сравнению с 2014 г., отмечено уменьшение площадей зарослей *Equisetum fluviatile* L. вблизи берегов в центральной части и в верховье водоёма. Согласно расчёту NDVI, площадь зарастания ВВР в верховье Омутнинского водохранилища в 2018 г. снизилась почти в 2 раза, по сравнению с 2011 г. (табл.).

В 2019 г. при маршрутном обследовании водоёма выявлена чёткая тенденция уменьшения площадей зарастания ВВР, в частности, значительно уменьшились размеры ассоциаций *Persicaria amphibia* (L.) S.F. Gray в центральной части (рис. 5) и в верховье водохранилища. В 2018–2019 гг. проводились мероприятия по углублению и очистке дна мелководий на центральном и приплотинном участках Омутнинского водохранилища, что могло оказать влияние на развитие ВВР.

Результаты расчёта NDVI подтверждают полевые наблюдения (табл.). По сравнению с предыдущими годами исследования растения выглядели более угнетённо. Известно, что на развитие ВВР оказывает влияние температурный режим среды [19]. Для сравнения, в 2011 г. средняя температура воздуха за летний сезон в г. Омутнинске составляла 17,1 °С, в 2018 г. – 16,7 °С, а в 2019 г. – 15,7 °С. Коэффициент корреляции между размером площадей зарастания в Омутнинском водохранилище и средней температурой воздуха за летний сезон составил 0,88.

Заключение

Высшие водные и прибрежно-водные растения в Омутнинском водохранилище распространяются на мелководных участках преимущественно вдоль береговой линии. Крупные заросли высших растений отмечены преимущественно в верховье водоёма, где для них складываются наиболее благоприятные условия. Доминирующее положение среди водных растений занимают *Equisetum fluviatile* L.,

Scirpus lacustris L., *Persicaria amphibia* (L.) S.F. Gray, *Potamogeton lucens* L., *P. perfoliatus* L. По видовому составу высших растений Омутнинское водохранилище является слабозтрофным водоёмом. За период наблюдений с 2011 по 2019 гг. методами дистанционного мониторинга в сочетании с полевыми исследованиями выявлена тенденция уменьшения площадей зарастания водоёма, а также отмечено уменьшение видового состава ВВР. В частности, практически перестали встречаться *Elodea canadensis* Michx., *Nuphar lutea* (L.) Smith, *Lemna trisulca* L., *L. minor* L., *Spirodela polyrhiza* (L.) Schleid, что косвенно может свидетельствовать об улучшении экологического состояния Омутнинского водохранилища, уменьшении поступления биогенных элементов с водосбора в водоём после мероприятий по очистке водохранилища. Площади зарастания верховья водохранилища ВВР за период с 2011 по 2019 гг. сократились с 0,320 до 0,087 км².

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых учёных – кандидатов наук (МК-86.2019.5).

References

1. Kazmiruk V.D., Kazmiruk T.N. Phytotechnology: current trends of wastewater treatment and water quality protection // Theoretical and Applied Ecology. 2016. No. 3. P. 76–81 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2016-3-076-081
2. Usenko O.M., Sakevich A.I. Allelopathic influence of higher aquatic plants on the functional activity of plankton algae // Hydrobiological Journal. 2005. V. 41. No. 3. P. 54–66. doi: 10.1615/HydrobJ.v41.i3.60
3. Chukina N.V., Borisova G.G. Structural and functional parameters of higher aquatic plants from habitats differing in levels of anthropogenic impact // Inland Water Biol. 2010. No. 3. P. 44–50. doi: 10.1134/S1995082910010062
4. Ivanova E.A., Anischenko O.V., Gribovskaya I.V., Zinenko G.K., Nazarenko N.S., Nemchinov V.G., Zuev I.V., Avramov A.P. Metal content in higher aquatic plants in a small siberian water reservoir // Contemp. Probl. Ecol. 2012. No. 5. P. 356–364. doi: 10.1134/S1995425512040063
5. Filonenko I.V., Komarova A.S. Long-term dynamics of the area overgrown with coastal aquatic vegetation of Lake Vozhe // Printsipy ekologii. 2015. No. 4. P. 63–72 (in Russian). doi: 10.15393/j1.art.2015.4622
6. Belavskaya A.P. Higher aquatic vegetation // Methodology for studying biogeocenoses of inland water bodies. Moskva: Nauka, 1975. P. 17–132 (in Russian).

7. Alekseeva E.V., Bazarova B.B. Dynamics of overgrowth of Lake Balzino (Eastern Transbaikalia) // Vestnik Buryatskogo gosudarstvennogo universiteta. 2008. No. 4. P. 97–99 (in Russian).
8. Lawniczak-Malińska A., Ptak M., Celewicz S., Choński A. Impact of lake morphology and shallowing on the rate of overgrowth in hard-water eutrophic lakes // Water. 2018. No. 10. Article No. 1827. doi: 10.3390/w10121827
9. Zalata A.E., Silkin K.Yu. Remote monitoring of the transformation of the Voronezh reservoir under the influence of a complex of natural and anthropogenic factors // Materialy Nauchnoy sessii Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Sektsiya ekologicheskoy geologii. 2015. V. 6. P. 17–22 (in Russian). doi: 10.13140/RG.2.2.16635.11049
10. Rizhinashvili A. Small and shallow previously unstudied lakes: land-use, overgrowth and eutrophication // Management of Environmental Quality. 2017. V. 28. No. 1. P. 120–136. doi: 10.1108/MEQ-09-2015-0170
11. Kochetkova A.I., Bryzgalina E.S., Kalyuzhnaya I.Yu., Sirotina S.L., Samoteeva V.V., Rakshenko E.P. Overgrowth dynamics of the Tsimlyansk reservoir // Printsipy ekologii. 2018. No. 1. P. 60–72 (in Russian). doi: 10.15393/j1.art.2018.7202
12. Mikhailova K.B., Mikhalap S.G. Long-term dynamics of the area of overgrowing with helophytic vegetation of lake Pskovskoe // Transformatsiya ekosistem. 2019. No. 2 (1). P. 86–93 (in Russian). doi: 10.23859/estr-180711
13. Jaskuła J., Sojka M. Assessing spectral indices for detecting vegetative overgrowth of reservoirs // Pol. J. Environ. Stud. 2019. V. 28. No. 6. P. 4199–4211. doi: 10.15244/pjoes/98994
14. Kut'yavina T.I., Ashikhmina T.Ya., Kondakova L.V. Application of ground-based research methods for the diagnostics of pollution and eutrophication of water reservoirs of the Kirov region // Theoretical and Applied Ecology. 2019. No 2. P. 44–52 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2019-2-044-052
15. Rouse Jr.J., Haas R.H., Schell J.A., Deering D.W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS // Proceedings of the Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium. Greenbelt: NASA Technical Reports Server, 1974. P. 309–317.
16. Lapirova A.G. Ecological groups of plants in water bodies // Hydrobotany: methodology, methods: Materialy Shkoly po gidrobotanike. Rybinsk: OAO "Rybinskiy Dom pechati", 2003. P. 5–22 (in Russian).
17. Barkan O.Yu., Zeizer N.M. The use of macrophytes in bioecological studies of water bodies // Vestnik Chelyabinskogo gosudarstvennogo universiteta. 2013. No. 7 (298). Biology. V. 2. P. 177–178 (in Russian).
18. Kut'yavina T.I., Domnina E.A., Ashikhmina T.Ya. Assessment of the water quality of the Omutninsky reservoir using physicochemical and bioindication methods // Problemy regionalnoy ekologii. 2014. No. 1. P. 131–137 (in Russian).
19. Bornette G., Puijalon S. Response of aquatic plants to abiotic factors: a review // Aquat. Sci. 2011. V. 73. P. 1–14. doi: 10.1007/s00027-010-0162-7