

Определение трофического статуса водоёма и пространственного распределения водной растительности по интегральным показателям

© 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, Республика Коми, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,
e-mail: kutyavinati@gmail.com

Определение трофического статуса водоёма необходимо для принятия решений об его использовании для производственных и бытовых целей. Расчёт индекса трофического состояния (ИТС) водоёма, основанный на измерении величины водородного показателя и содержания растворённого кислорода в воде, позволяет оценить трофическое состояние водного объекта вне зависимости от его типа и региона исследования. По результатам многолетних данных установлена зависимость величины рН от степени насыщения воды кислородом для одного из крупнейших водоёмов Кировской области, подверженного эвтрофированию (Омутнинского водохранилища). По найденной зависимости рассчитан ИТС водоёма. За 9 лет наблюдений ИТС увеличился с 7,8 до 8,1 ед., что свидетельствует о переходе Омутнинского водохранилища из мезотрофного в эвтрофный тип. С помощью методов дистанционного зондирования Земли на акватории водоёма выявлены участки массового развития фитопланктона и высших водных растений. Данные, полученные при расчёте индекса мутности и индекса концентрации хлорофилла *a* в воде, согласуются с данными полевых наблюдений и могут быть в дальнейшем использованы при проведении экологического мониторинга Омутнинского водохранилища и других водоёмов региона.

Ключевые слова: эвтрофирование, «цветение» воды, растворённый кислород в воде, индекс трофического состояния, дистанционное зондирование Земли, Sentinel-2, индекс мутности, индекс концентрации хлорофилла *a*.

Determination of the trophic status of the water reservoir and spatial distribution of aquatic vegetation by integral indicators

© 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

Determination of the trophic status of a reservoir is necessary for making decisions on the use of a water body for industrial production and domestic purposes. The calculation of the trophic state index (ITS) of a reservoir based on measuring the value of the hydrogen index and the content of dissolved oxygen in water allows us to evaluate the trophic state of a water body, regardless of its type and region of study. According to the results of the physicochemical analysis of water for 2011–2019, the dependence of pH on the degree of oxygen saturation of water was established for one of the largest reservoirs in the Kirov region (Omutninsky reservoir) which is subjected to eutrophication. Based on the dependence found, the ITS index of the reservoir was calculated. Over 9 years of observations, ITS increased from 7.8 to 8.1 units, which indicates the transition of the Omutninsk reservoir from the mesotrophic to the eutrophic type. Using the Earth remote sensing methods for the reservoir, areas of mass development of phytoplankton and higher aquatic plants have been identified. Field observations in these areas revealed thickets of *Equisetum fluviatile* L., *Scirpus lacustris* L., *Persicaria amphibia* (L.) S. F. Gray, *Rotamogeton lucens* L. The data obtained by calculating the turbidity index and

the concentration index of chlorophyll *a* in water are consistent with field data observations and can be further used in environmental monitoring of the Omutninsk reservoir and other reservoirs in the region.

Keywords: eutrophication, algae “bloom”, dissolved oxygen, index of trophical state, Earth remote sensing, Sentinel-2, turbidity index, chlorophyll *a* concentration index.

Одной из острых проблем современности является эвтрофирование водоёмов, при котором наблюдается изменение их трофического статуса, массовое развитие в воде водорослей и цианобактерий, высших растений [1, 2]. Актуальная информация об изменениях трофического состояния водных объектов необходима для принятия решений о пригодности их для хозяйственно-питьевого водоснабжения и промышленно-бытовых нужд.

Для исследования и мониторинга водных объектов широко применяются методы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Они не требуют прямого взаимодействия с исследуемым объектом и позволяют рассматривать достаточно крупные и отдалённые акватории. Главным образом, ведётся дистанционный мониторинг морей и океанов с целью отслеживания изменений береговой линии [3, 4], наблюдения за движением плавучих льдов [5], распространением нефтяных пятен и другого рода загрязнений [6], распространением фитопланктона [7, 8]. Дистанционное зондирование для изучения наземных водных объектов используется реже. При дистанционном мониторинге подобных объектов возникает ряд сложностей. На качество снимка влияет состояние атмосферы на момент съёмки. Специфичным для наземных водных объектов является их размер. Минимальное разрешение изображения, снятого с космического аппарата Sentinel-2, составляет 10 м. На снимках с крупным разрешением малые водоёмы будут неразличимы. Поэтому, минимальная ширина реки или водоёма должна составлять не менее 100 м при десятиметровом разрешении снимка. Методы ДЗЗ позволяют обнаружить в водных объектах скопления фитопланктона и заросли высших растений, проследить динамику их развития [7, 9].

Использование комплекса традиционных наземных и дистанционных методов исследования позволяет получать более точные сведения о состоянии водных объектов и составлять прогноз об изменении их трофического состояния.

Цель данной работы – определение трофического статуса водоёмов, в разной степени подверженных эвтрофированию, а также пространственного распределения по аква-

тории фитопланктона и зарослей высших водных растений с помощью наземных и дистанционных методов исследования.

Материалы и методы

Исследование проводили на крупных водохранилищах Кировской области: Белохолуницком, Омутнинском, Большом Кирсинском и Чернохолуницком. Это искусственные водоёмы, созданные для водоснабжения металлургических заводов региона путём сооружения плотин на реках ещё в XVIII веке. С помощью химических и биологических методов исследования установлено, что по трофо-сапробным показателям все изучаемые водохранилища являются β-мезосапробными, по трофической шкале классификации водоёмов они соответствуют эвтрофному классу. При этом Омутнинское водохранилище является наиболее загрязнённым аммонийным азотом и органическими веществами по перманганатной окисляемости и химическому потреблению кислорода. По видовому составу высшей водной растительности и степени зарастания оно является слабоэвтрофным, по степени развития микроорганизмов относится к мезосапробной зоне, по отношению БПК₅/перманганатная окисляемость испытывает сильное сапробное загрязнение [10]. Данный водоём выбран в качестве модельного для дальнейшего исследования.

В ходе работы рассчитан индекс трофического состояния (ИТС), разработанный в Санкт-Петербургском государственном архитектурно-строительном университете для оценки экологического состояния водных объектов [11]. Индекс представляет собой интегральный показатель, основанный на линейной зависимости величины рН от насыщения воды кислородом. По величине ИТС можно определить трофическое состояние водоёма. Для дистрофных водоёмов значения индекса менее 6,0; ультраолиготрофных – 6,0–6,7; олиготрофных – 6,7–7,3; мезотрофных – 7,3–8,0; эвтрофных – более 8,0 единиц [11, 12].

Степень развития фитопланктона и высших растений в поверхностном слое воды определяли по данным ДЗЗ. В качестве источника для дешифрирования данных ДЗЗ были

задействованы снимки спутника Sentinel-2B, находящиеся в открытом доступе, с разрешением 10 м. Пригодными для дешифрирования в 2019 г. оказались снимки от 15 августа, 7 и 10 сентября. Для исследования водных объектов и растительности использовали синий (B2, 459–525 нм), зелёный (B3, 541–577 нм) и красный (B4, 650–681 нм) каналы. В ходе работы были рассчитаны индекс концентрации хлорофилла *a* в воде (формула расчёта: $(B2-B4)/B3$) и индекс мутности воды (формула расчёта: $B2/(B2 + B3 + B4)$). [13]. Как отмечают авторы работы [13], коэффициент корреляции между фактическим содержанием хлорофилла *a* и значениями индекса его концентрации составляет -0,78; между мутностью воды и значениями индекса мутности $r = 0,73$. Для построения индексных карт использовали программный продукт QGIS версии 3.10.

Результаты и обсуждение

На основе результатов гидрохимического анализа за 2011–2019 гг. для Омутнинского водохранилища была выявлена зависимость величины рН от степени насыщения воды кислородом (рис. 1), которая подтверждается статистическим анализом результатов по *t*-критерию Стьюдента. В работе [12] показано, что в водоёмах различного трофического уровня величина рН и процентное содержание кислорода тесно коррелируют ($r = 0,70–0,99$), их связь носит линей-

ный характер. Наши результаты согласуются с этим положением, коэффициент корреляции равен 0,82.

За период исследования значения рН изменялись в достаточно широких пределах, от 6,6 до 9,4 ед. (рис. 1), однако слабощелочная реакция среды преобладала. Согласно [11], величина рН, рассчитанная по найденным зависимостям для нормального 100%-ного насыщения воды кислородом, тем больше, чем выше трофический статус водоёма, и может служить интегральным показателем его трофического состояния.

Индекс ИТС, рассчитанный по результатам химического анализа воды Омутнинского водохранилища, увеличился с 7,8 в 2011 г. до 8,1 ед. в 2019 г. Согласно классификации по величине ИТС, водоём за 9 лет наблюдений перешёл из мезотрофного типа в эвтрофный. Как правило, при таком переходе наблюдается увеличение скорости первичного продуцирования, массовое развитие фитопланктона и высших водных растений [14].

Пространственное и временное распределение фитопланктона и высших растений в поверхностном слое воды можно оценить с помощью расчёта таких спектральных индексов, как индексы концентрации хлорофилла *a* в воде и мутности.

Скопления фитопланктона и высших растений в Омутнинском водохранилище встречаются преимущественно в верховье и центральной части водоёма. Об этом свидетель-

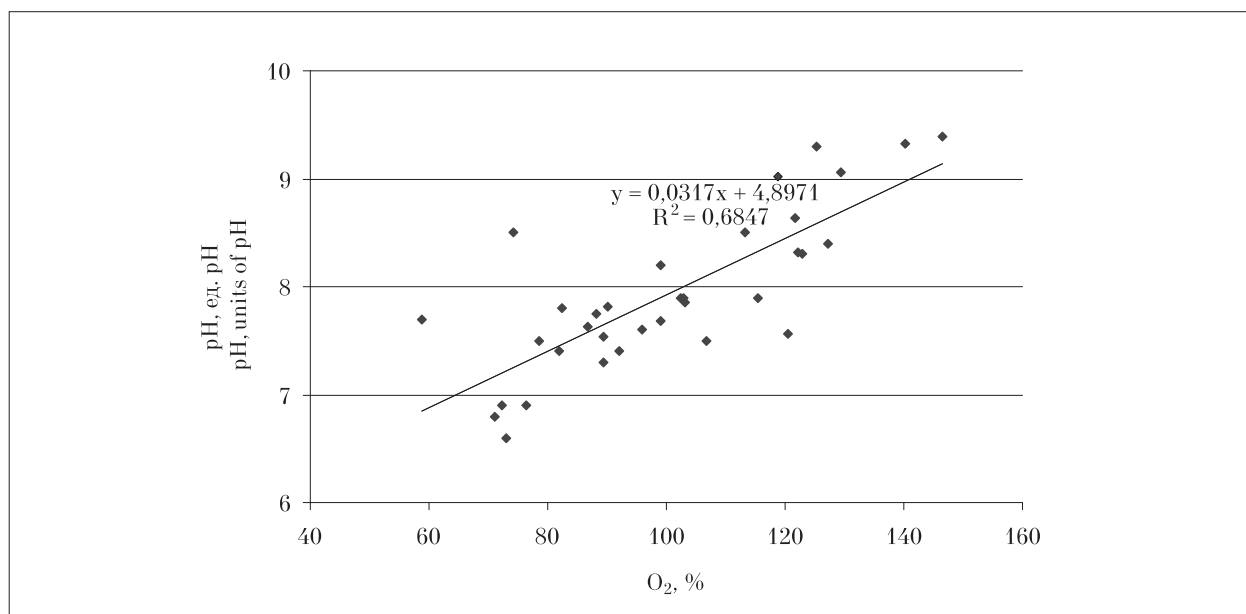


Рис. 1. Корреляционная зависимость рН от степени насыщения воды кислородом в Омутнинском водохранилище ($p < 0,05$)
Fig. 1. The correlation dependence of pH on the degree of saturation of water with oxygen in the Omutninsk reservoir ($p < 0,05$)

ствуют результаты дешифрирования космических снимков, а также данные полевых наблюдений 2011–2019 гг. На рисунках 2 и 3 (см. обложку, с. 3) представлены карты Омутнинского водохранилища, построенные по результатам расчёта индексов концентрации хлорофилла *a* и мутности воды в 2019 г.

Высокая концентрация хлорофилла *a* в летние месяцы отмечена в верховье водоёма, вблизи устья реки Омутной. На этой акватории при полевых наблюдениях были обнаружены заросли хвоща речного (*Equisetum fluviatile* L.), отдельными куртинами встречался камыш озёрный (*Scirpus lacustris* L.) и горец земноводный (*Persicaria amphibia* (L.) S. F. Gray). Значения индекса на этом участке достигали 0,4–0,5 ед. Далее, при продвижении к центральному участку, значения индекса возрастали до 0,8–0,9 ед., а на мелководных участках в приплотинной части водоёма снова снижались. В самой северной части водоёма выделяется участок с минимальными значениями индекса концентрации хлорофилла (0,4–0,5 ед.). На нём при полевых наблюдениях отмечены заросли рогоза широколистного (*Typha latifolia* L.).

В осенний период максимальные значения индекса зарегистрированы ближе к центральной части водохранилища. На снимке чётко выделяется участок акватории со значениями индекса до 0,9 ед. (рис. 2). Минимальные значения индекса (0,4–0,5 ед.), также как и в летние месяцы, отмечены в верховье водоёма и на небольшом участке в его приплотинной части. Так как источники антропогенного воздействия в верховье водоёма практически отсутствуют, вероятно, что повышение биологической продуктивности на данном участке может быть связано с природными факторами.

Участки с максимальными значениями индекса концентрации хлорофилла *a* совпадают с участками, на которых отмечена высокая мутность воды (рис. 3).

Как видно из рисунка 3, мутность воды на разных участках водохранилища отличается от 0,40 до 0,50 ед. Минимальные значения индекса мутности отмечены в верховье водоёма (в месте впадения р. Омутной) и на приплотинном участке (в северной части водоёма). Наибольшие значения индекса зафиксированы на участке ближе к центру водохранилища. Как отмечалось в работе [13], причинами повышенной мутности воды могут быть: присутствие тонкодисперсных неорганических взвесей и соединений, наличие органических примесей или живых организмов, а также коллоиды, которые образуются при окислении соеди-

нений железа и марганца. При полевых наблюдениях на этом участке акватории мы отмечали заросли высших водных растений. В целом, можно отметить уменьшение мутности воды при продвижении от верховья Омутнинского водохранилища к его приплотинному участку. Подобная закономерность отмечена нами и на других снимках, сделанных в летний период.

Заключение

Изменение трофического состояния Омутнинского водохранилища за период с 2011 по 2019 гг. и его переход от мезотрофного к эвтрофному типу свидетельствуют об увеличении интенсивности эвтрофирования данного водоёма, что выражается в увеличении биологической продуктивности водного объекта. Согласно данным ДЗЗ, наиболее подвержены эвтрофированию мелководные участки в центральной части и в верховье водохранилища. На них ежегодно обнаруживаются заросли высших водных растений. В центральной и приплотинной частях отмечается «цветение» воды. Расчёт спектральных индексов концентрации хлорофилла *a* и мутности позволило дистанционно выявить пространственное распределение по акватории зарослей водных растений. Данный метод может быть использован в дальнейшем при проведении экологического мониторинга Омутнинского водохранилища и других водоёмов региона.

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

Литература

1. Мирненко Э.И. Особенности эвтрофирования Нижнекальмиусского водохранилища // Проблемы экологии и охраны природы техногенного региона. 2019. № 3–4. С. 24–30.
2. Khorasani H., Kerachian R., Malakpour-Estalaki S. Developing a comprehensive framework for eutrophication management in off-stream artificial lakes // Journal of Hydrology. 2018. V. 562. P. 103–124.
3. Suo A., Zhang M. Sea areas reclamation and coastline change monitoring by remote sensing in coastal zone of Liaoning in China // Journal of Coastal Research. 2015. Special Issue 73 – Recent Developments of Port and Ocean Engineering. P. 725–729.
4. Xu N. Detecting coastline change with all available Landsat data over 1986–2015: A case study for the State of Texas, USA // Atmosphere. 2018. V. 9. P. 107.

5. Campbell W.J., Weeks W.F., Ramseier R.O., Gloersen P. Geophysical studies of floating ice by remote sensing // *Journal of Glaciology*. Access. 1975. V. 15. No. 73. P. 305–328.

6. Fingas M., Brown C.E. A review of oil spill remote sensing // *Sensors (Basel)*. 2018. V. 18. No. 1. P. 91.

7. Навроцкий В.В., Дубина В.А., Павлова Е.П., Храпченков Ф.Ф. Анализ спутниковых наблюдений концентрации хлорофилла в заливе Петра Великого (Японское море) // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2019. Т. 16. № 1. С. 158–170.

8. Anttila S., Fleming-Lehtinen V., Attila J., Junttila S., Alasalmi H., Hällfors H., Kervinen M., Koponen S. A novel earth observation based ecological indicator for cyanobacterial blooms // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2018. V. 64. P. 145–155.

9. Wang G., Lee Z., Mouw C. Multi-spectral remote sensing of phytoplankton pigment absorption properties in cyanobacteria bloom waters: A regional example in the Western Basin of Lake Erie // *Remote Sens*. 2017. V. 9. P. 1309.

10. Кутявина Т.И., Ашихмина Т.Я., Кондакова Л.В. Применение комплекса наземных методов исследования для диагностики загрязнения и процессов эвтрофирования водохранилищ Кировской области // *Теоретическая и прикладная экология*. 2019. № 2. С. 44–52.

11. Неверова-Дзюпак Е.В., Цветкова Л.И., Макарова С.В., Киселев А.В. Об экологической безопасности водных объектов // *Современные проблемы науки и образования*. 2012. № 3. С. 136 [Электронный ресурс] <https://www.science-education.ru/pdf/2012/3/229.pdf> (Дата обращения: 13.02.2020).

12. Цветкова Л.И., Неверова-Дзюпак Е.В. Как оценить опасный уровень антропогенного эвтрофирования пресноводных экосистем // *Вестник гражданских инженеров*. 2019. № 6 (77). С. 262–270.

13. Тихомиров О.А., Бочаров А.В., Комиссаров А.Б., Хижняк С.Д., Пахомов П.М. Использование данных сенсора Landsat 8 (OLI) для оценки показателей мутности, цветности и содержания хлорофилла в воде Иваньковского водохранилища // *Вестник ТвГУ. Серия «Химия»*. 2016. № 2. С. 230–244.

14. Розумная Л.А. Антропогенная эвтрофикация пресноводных озёр средней полосы России // *Достижения науки и техники АПК*. 2011. № 2. С. 78–80.

3. Suo A., Zhang M. Sea areas reclamation and coastline change monitoring by remote sensing in coastal zone of Liaoning in China // *Journal of Coastal Research*. 2015. Special Issue 73 – Recent Developments of Port and Ocean Engineering. P. 725–729. doi: 10.2412/SI73-124.1

4. Xu N. Detecting coastline change with all available Landsat data over 1986–2015: A case study for the State of Texas, USA // *Atmosphere*. 2018. V. 9. P. 107. doi: 10.3390/atmos9030107

5. Campbell W.J., Weeks W.F., Ramseier R.O., Gloersen P. Geophysical studies of floating ice by remote sensing // *Journal of Glaciology*. Access. 1975. V. 15. No. 73. P. 305–328. doi: 10.3189/S0022143000034456

6. Fingas M., Brown C.E. A review of oil spill remote sensing // *Sensors (Basel)*. 2018. V. 18. No. 1. P. 91. doi: 10.3390/s18010091

7. Navrotsky V.V., Dubina V.A., Pavlova E.P., Храпченков Ф.Ф. Analysis of satellite observations of chlorophyll concentration in Peter the Great Bay (Sea of Japan) // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2019. V. 16. No. 1. P. 158–170 (in Russian). doi: 10.21046/2070-7401-2019-16-1-158-170

8. Anttila S., Fleming-Lehtinen V., Attila J., Junttila S., Alasalmi H., Hällfors H., Kervinen M., Koponen S. A novel earth observation based ecological indicator for cyanobacterial blooms // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2018. V. 64. P. 145–155. doi: 10.1016/j.jag.2017.09.007

9. Wang G., Lee Z., Mouw C. Multi-spectral remote sensing of phytoplankton pigment absorption properties in cyanobacteria bloom waters: A regional example in the Western Basin of Lake Erie // *Remote Sens*. 2017. V. 9. P. 1309. doi: 10.3390/rs9121309

10. Kutyavina 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

11. Neverova-Dziopak E.V., Tsvetkova L.I., Makarova S.V., Kiselev A.V. On the environmental safety of water bodies // *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*. 2012. No. 3. P. 136 [Internet resource] <https://www.science-education.ru/pdf/2012/3/229.pdf> (Accessed: 13.02.2020) (in Russian).

12. Tsvetkova L.I., Neverova-Dziopak E.V. How to assess the dangerous level of anthropogenic eutrophication of freshwater ecosystems // *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2019. No. 6 (77). P. 262–270 (in Russian).

13. Tikhomirov O.A., Bocharov A.V., Komissarov A.B., Khizhnyak S.D., Pakhomov P.M. Using Landsat 8 (OLI) sensor data to measure turbidity, color, and chlorophyll content in the water of the Ivankovo reservoir // *Vestnik TvGU. Seriya Khimiya*. 2016. No. 2. P. 230–244 (in Russian).

14. Rozumnaya L.A. Anthropogenic eutrophication of freshwater lakes in central Russia // *Dostizheniya nauki i tekhniki APK*. 2011. No. 2. P. 78–80 (in Russian).

References

1. Mirnenko E.I. Features of the eutrophication of the Nizhnekalmius reservoir // *Problemy ekologii i okhrany prirody tekhnogennogo regiona*. 2019. No. 3–4. P. 24–30 (in Russian).

2. Khorasani H., Kerachian R., Malakpour-Estalaki S. Developing a comprehensive framework for eutrophication management in off-stream artificial lakes // *Journal of Hydrology*. 2018. V. 562. P. 103–124. doi: 10.1016/j.jhydrol.2018.04.052

Т. И. КУТЯВИНА, В. В. РУТМАН, Т. Я. АШИХМИНА
«ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРОФИЧЕСКОГО СТАТУСА ВОДОЁМА
И ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВОДНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ
ПО ИНТЕГРАЛЬНЫМ ПОКАЗАТЕЛЯМ», С. 42

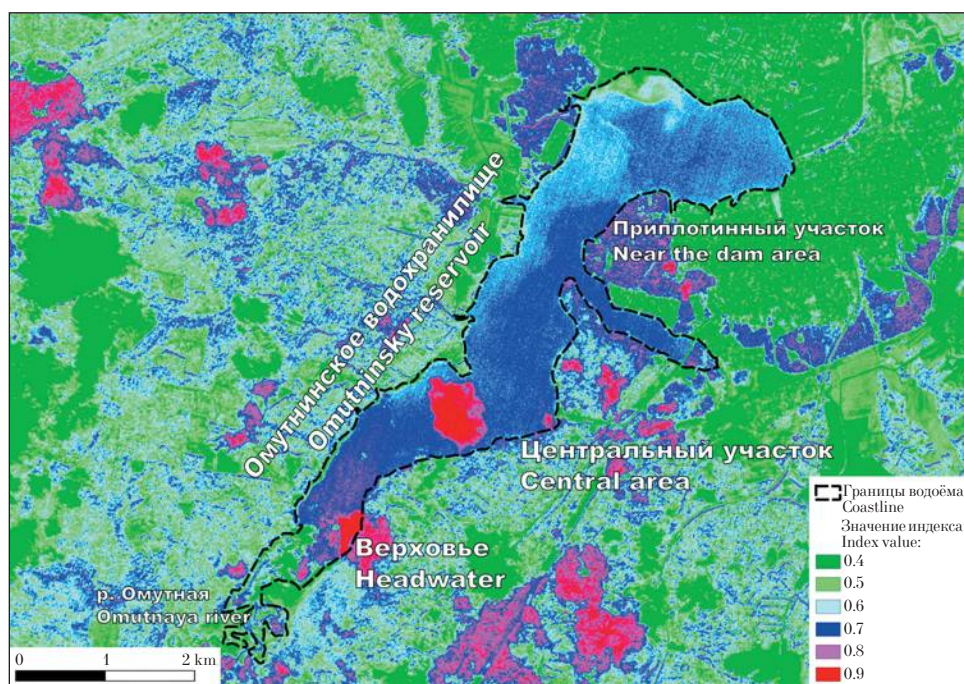


Рис. 2. Значения индекса концентрации хлорофилла *a* на карте-схеме Омутнинского водохранилища, построенной по результатам дешифрирования (07.09.2019)
Fig. 2. The values of the concentration index of chlorophyll *a* on the map-diagram of the Omutninsk reservoir, based on the results of interpretation (07.09.2019)

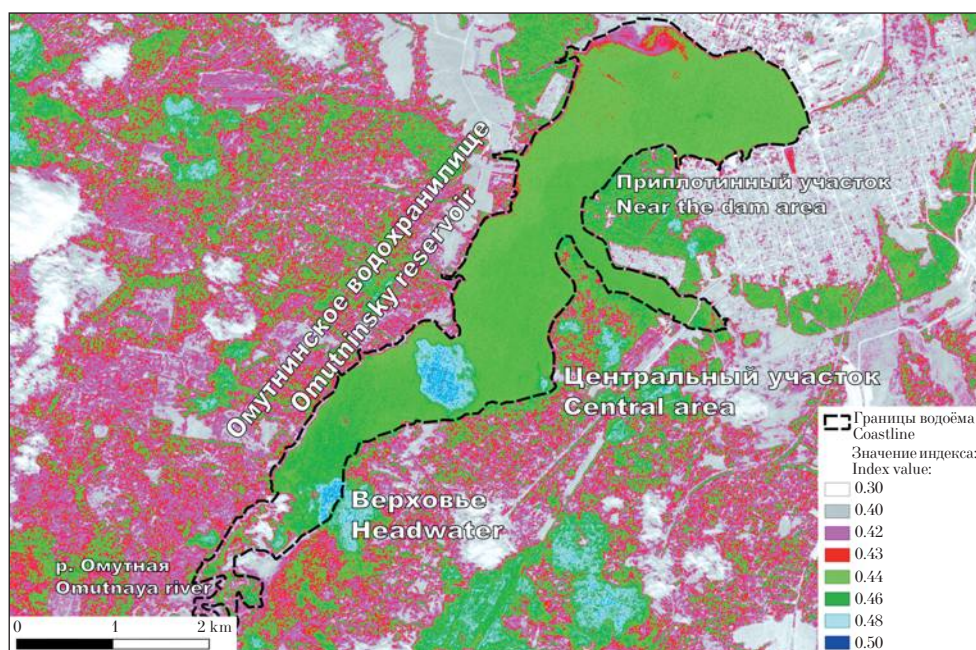


Рис. 3. Значения индекса мутности на карте-схеме Омутнинского водохранилища, построенной по результатам дешифрирования (07.09.2019)
Fig. 3. Turbidity index values on the map-diagram of the Omutninsk reservoir, based on the results of interpretation (07.09.2019)