

Использование космических снимков для определения границ водоёмов и изучения процессов эвтрофикации

© 2019. 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,
В. П. Савиных^{1,3}, д. т. н., профессор, член-корреспондент РАН,

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,

³Московский государственный университет геодезии и картографии,
105064, Россия, г. Москва, Гороховский переулок, д. 4,

e-mail: kutyavinati@gmail.com

Проведено дешифрирование космических снимков со спутника Landsat 5. Определены индексы цвета, мутности, концентрации хлорофилла *a*, нормализованный вегетационный индекс (NDVI) и нормализованный разностный индекс воды (NDWI) для Белохолуницкого, Омутнинского, Большого Кирсинского и Чернохолуницкого водохранилищ Кировской области. Отмечено, что в условиях высокой мутности и цветности воды наиболее информативными для выявления береговой линии водных объектов являются индексы NDVI и NDWI. В весенний период значения индексов цвета воды, NDVI и NDWI ниже, чем в летний период. Показана возможность проведения оценки и сравнения степени развития фитопланктона, его пространственного распределения по акватории водохранилищ Кировской области с помощью индексов мутности и концентрации хлорофилла *a* в воде.

Ключевые слова: эвтрофирование, дистанционное зондирование Земли, Landsat 5, нормализованный вегетационный индекс, нормализованный разностный индекс воды, индекс цвета, индекс мутности, индекс концентрации хлорофилла *a*, «цветение» воды.

The use of satellite images to determine the boundaries of water bodies and study the processes of eutrophication

© 2019. 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, V. P. Savinykh^{1,3} ORCID: 0000-0002-3259-6721,

¹Vyatka State University,

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

²Institute of Biology of the Komi Scientific Centre
of the Ural Branch of RAS,

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

³Moscow State University of Geodesy and Cartography,

4, Gorokhovskiy Pereulok, Moscow, Russia, 105064,

e-mail: kutyavinati@gmail.com

The purpose of the work is to select the most informative spectral indices for determining the boundaries of reservoirs and diagnosing the processes of eutrophication of water bodies in the Kirov region. Five satellite images obtained from the Landsat 5 satellite were decrypted. The water color index, turbidity index, chlorophyll concentration index *a*, normalized vegetation index (NDVI) and normalized index of water refractive index (NDWI) for four reservoirs in the Kirov region were determined: Belokholunitskoye, Omutninskoye, Bol'shoye Kirsinskoye and Chernokholunitskoye. To confirm and correct the data of deciphering the images, we used the results of bathymetric surveys, algological and chemical analyzes of water from the reservoirs of the Kirov region, obtained during ground-based field observations in water bodies. To build index maps, we used the QGIS software product, versions 2.18 and 3.8. Scales for indices were selected empirically, highlighting areas with similar indices. The minimum and maximum values of the index in the reservoirs were taken as the boundaries of the scale. It is noted that with high turbidity (more than 8 units of turbidity by formazine) and high water color (from 42 to 398 degrees of color), the most informative indicators for identifying the

boundaries of water bodies are the NDVI and NDWI indices. On satellite images taken in the spring, water color indices, NDVI and NDWI are lower than in the summer. In the Omutninsk reservoir, an increase in the turbidity index during the mass development of phytoplankton was noted. The ability to assess and compare the degree of development of phytoplankton, its spatial distribution over the water area of the Kirov region reservoirs using the turbidity indices and the concentration of chlorophyll *a* in water is shown. When analyzing index charts, it was noted that the maximum values of the chlorophyll concentration index *a* correspond to areas of the water area occupied by thickets of higher aquatic plants (Omutninskoe reservoir) and shallow areas with delayed water exchange (Omutninskoye, Belokholunitskoye reservoirs).

Keywords: eutrophication, remote sensing of the Earth, Landsat 5, normalized difference vegetation index, normalized difference water index, color index, turbidity index, chlorophyll concentration index *a*, algae "bloom".

В настоящее время антропогенная эвтрофикация рассматривается как один из важнейших факторов негативного воздействия человеческой деятельности на водные объекты. При эвтрофикации часто наблюдается «цветение» воды и массовое развитие высших водных растений. Это приводит к снижению рыбохозяйственного и рекреационного потенциалов водоёмов, оказывает негативное влияние на системы очистки воды из водных объектов для питьевого водоснабжения. Проблема интенсивного «цветения» воды, или массового развития водорослей и цианобактерий (ЦБ), актуальна для самых разных морских и пресноводных акваторий [1]. Показатели количественного обилия водорослей и ЦБ широко используются при определении трофического статуса водоёмов для принятия решений по их экологической реабилитации [2]. Однако получение этих данных является довольно трудоемким и затратным процессом, не позволяющим одновременно обрабатывать данные по удалённым друг от друга акваториям.

Современные спутниковые снимки и использование аэросъёмки позволяют дистанционно осуществлять мониторинг акваторий на качественно ином уровне, дополняя и частично заменяя непосредственные полевые исследования. Использование данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) обеспечивает полномасштабный и оперативный мониторинг состояния крупных водоёмов, а также распределение фитопланктона по всей акватории [3, 4]. Работы по использованию данных ДЗЗ для оценки «цветения» воды и трофического статуса водоёмов начали применяться за рубежом с конца 1990-х, в России – с 2000-х гг. Чаще исследования проводятся для морских акваторий, крупных водохранилищ, проведена работа на Ладожском и Псковско-Чудском озёрах, Ивановском водохранилище [5]. Разработан индекс «цветения» ЦБ СуаVI, апробированный на центральной и северо-восточной части Балтийского моря [6]. Однако работы по изучению «цветения» воды средствами ДЗЗ единичны, охватывают малое количество во-

доёмов. Существующие стандартные алгоритмы получения количественных характеристик «цветения» воды на основе данных ДЗЗ имеют ограничения применения, связанные с морфологическими, гидрохимическими и биологическими особенностями водных объектов. В связи с этим необходимо развивать региональные алгоритмы оценки данных ДЗЗ для внутренних пресноводных водоёмов, позволяющие получать достоверные результаты. При этом корректность интерпретации данных ДЗЗ должна подтверждаться результатами наземных наблюдений и исследований (гидрохимических, альгологических и др.).

Цель данной работы – подобрать наиболее информативные спектральные индексы для определения береговой линии водоёмов и диагностики процессов эвтрофирования водных объектов Кировской области.

Материалы и методы

В работе использовались космические снимки со спутника Landsat 5, даты съёмки 07.05.2011, 16.05.2011, 26.07.2011, 11.08.2011, 13.08.2011 (источник: U.S. Geological Survey). Для подтверждения и корректировки данных дешифрирования снимков использовали результаты батиметрической съёмки, альгологического и химического анализов воды из Белохолуницкого, Омутнинского, Большого Кирсинского и Чернохолуницкого водохранилищ Кировской области [7], полученных во время наземных полевых наблюдений на водоёмах 20.06.2011, 28.07.2011 и 05.10.2011.

В ходе работы были рассчитаны индекс цвета воды, нормализованный вегетационный индекс (NDVI) и нормализованный разностный индекс воды (NDWI), которые широко используются для обнаружения водных объектов по космическим многоспектральным изображениям [8–11], а также определены индексы мутности воды и концентрации хлорофилла *a*, которые имеют важное значение для выявления степени эвтрофирования водных объектов.

Расчёт NDVI проводили по формуле:

$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)},$$

где NIR – канал В4 ближнего инфракрасного спектра отражения с диапазоном 0,76–0,90 мкм, на космоснимках со спутника Landsat 5 этот канал выделяет береговую линию водоёма и отображает уровень развития биомассы растительности; RED – канал В3, представляет собой красный диапазон видимого спектра отражения солнечного излучения со значением 0,63–0,69 мкм, используется для оценки состояния и качества растительности.

Индекс NDVI обычно применяется для определения состояния наземной растительности, главным образом в сельскохозяйственной отрасли. Поскольку вегетационный индекс для исследования водохранилищ Кировской области применялся впервые, то возникла необходимость создания шкалы NDVI для водных объектов. Обычно показатель этого индекса для воды находится в диапазоне от -1 до 0. Однако нулевое значение индекса можно считать лишь условным, поскольку значения индекса для увлажнённых земель могут быть ниже нуля, а водоёмы, подверженные процессам эвтрофикации, окажутся со значениями выше нулевых. Надводная растительность может дать очень высокие показатели, близкие к единице.

Формула для расчёта NDWI имеет вид:

$$NDWI = \frac{(NIR - SWIR)}{(NIR + SWIR)},$$

где SWIR – дальний инфракрасный канал В5 с диапазоном длин волн 1,55–1,75 мкм. Канал В5 более чувствителен к влаге и позволяет чётко выделить береговую линию водоёма.

Первоначально индекс использовался только для мониторинга содержания воды в листьях растений. Затем NDWI начали применять для мониторинга водоёмов, обнаружения затоплений.

Индекс цвета рассчитывали как отношение:

$$\frac{GREEN}{BLUE},$$

где GREEN – зелёный канал видимого спектра излучения В2, с диапазоном спектра 0,52–0,60 мкм, позволяет обнаружить растительность; BLUE – синий диапазон спектра видимого электромагнитного излучения 0,45–0,52 мкм, канал В1. Этот канал выделяет глубину водоёмов, почву и отличает хвойные деревья от лиственных. Он крайне важен для

исследования состояния водных объектов, особенно таких показателей, как мутность, концентрация хлорофилла в воде, плотность и пространственное распределение планктонных водорослей [4].

Индекс мутности рассчитывали по формуле:

$$\frac{BLUE}{(BLUE + GREEN + RED)}.$$

Индекс мутности, или содержание взвеси в воде, был смоделирован при исследовании эталонных образцов на спектрофотометре. Индекс мутности позволяет сравнить показатели разных участков водоёмов и разные водоёмы в одно и то же время. Для получения точных показателей мутности на основе индекса требуется сопоставление с результатами полевых исследований.

Для расчёта индекса концентрации хлорофилла *a* использовали формулу:

$$\frac{(BLUE - RED)}{GREEN}.$$

Диапазон спектра отражения хлорофилла *a* установлен экспериментальным путём при исследовании водорослей пробах воды на спектрофотометре. Позже было предложено использовать снимки спутника Landsat 7 с аналогичным спектром электромагнитного излучения [5].

Так как создание шкал для растительно-водных индексов путём дробления на равные интервалы не всегда приводит к получению наглядной и достоверной карты, была проведена дополнительная работа со снимками. Путём просмотра значений показателя индекса были выделены области со сходными значениями. На основании этих показателей были выведены шкалы для индексов. Минимальное и максимальное значение индекса в водоёмах было принято как границы шкалы.

Для построения индексных карт использовали программный продукт QGIS версии 2.18 и 3.8.

Результаты и обсуждение

По значениям индексов цвета воды, NDVI и NDWI определены береговые линии Белохолуницкого, Омутнинского, Большого Кирсинского и Чернохолуницкого водохранилищ. Для сравнения были использованы границы водохранилищ, проведённые по данным визуального дешифрирования космических снимков. Анализ построенных индексных карт показал, что на исследуемой территории NDVI

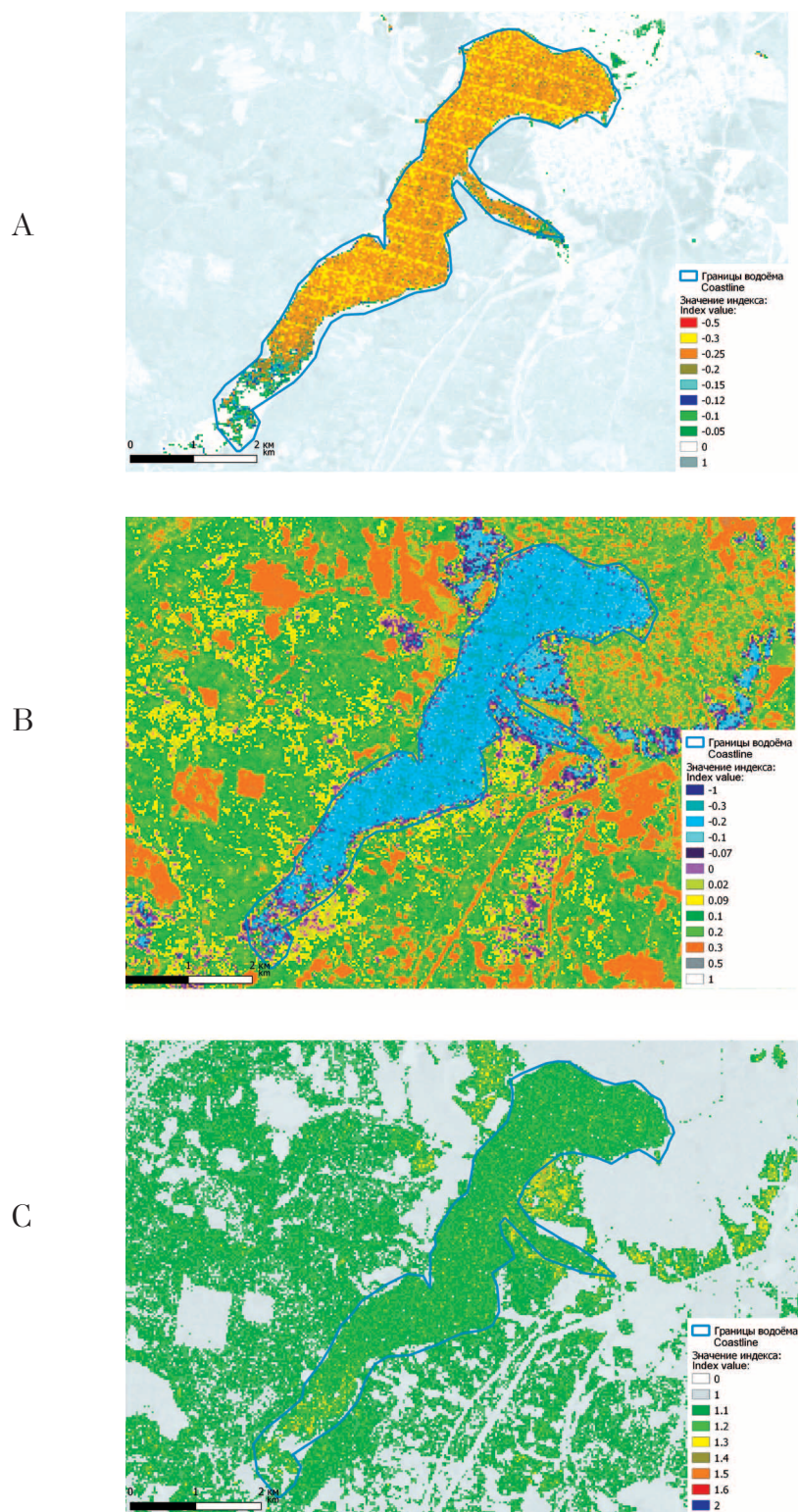


Рис. 1. Определение границ Омутнинского водохранилища по спектральным индексам (снимок от 16.05.2011): А – NDVI, В – NDWI, С – индекс цвета воды
Fig. 1. Determination of the boundaries of the Omutninsk reservoir by spectral indices (snapshot from May 16, 2011): А – NDVI, В – NDWI, С – water color index

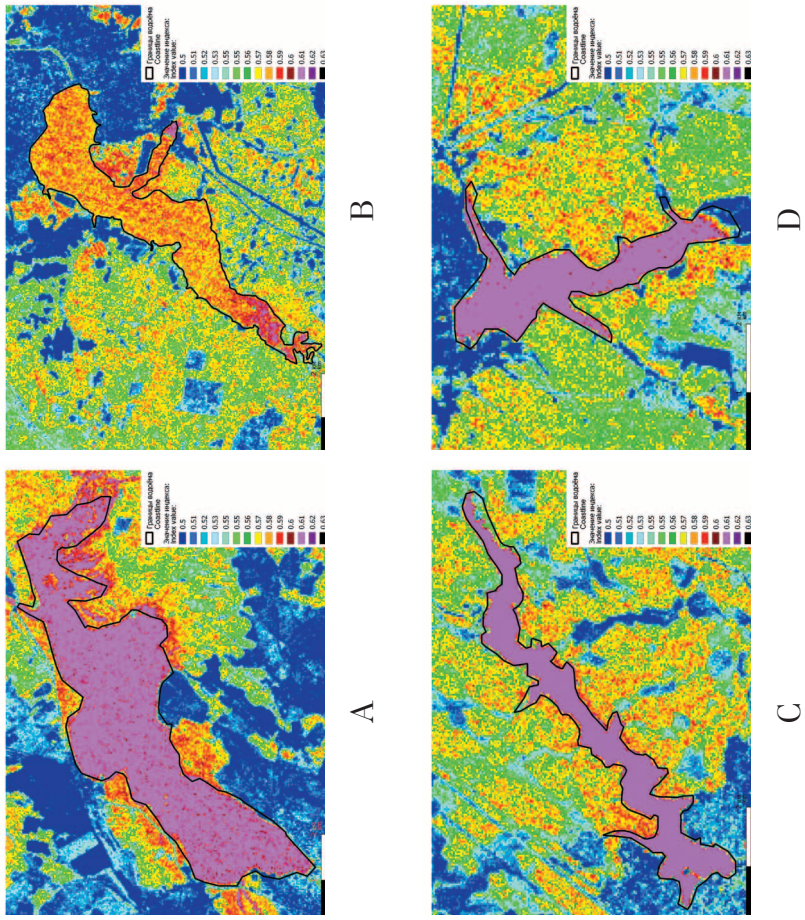


Рис. 2. Значения индекса мутности для водохранилищ Кировской области: А – Белохолуницкое, В – Омутнинское, С – Большое Киринское, D – Чернохолуницкое (снимок от 16.05.2011)
Fig. 2. Turbidity index values for reservoirs of the Kirov region: A – Belokholunitskoye, B – Omutninskoye, C – Bol'shoye Kirsinskoye, D – Chernokholunitskoye (snapshot from May 16, 2011)

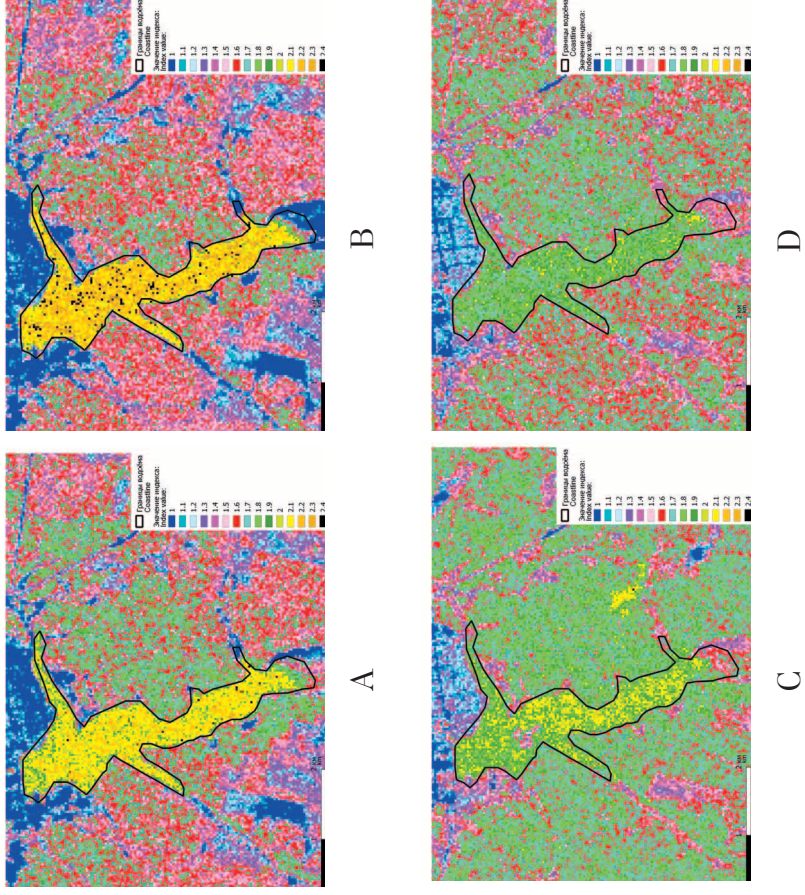


Рис. 3. Значения индекса хлорофилла a для Чернохолуницкого водохранилища Кировской области: А – 07.05.2011, В – 16.05.2011, С – 26.07.2011, D – 11.08.2011
Fig. 3. The values of the chlorophyll index a for the Chernokholunitsky reservoir of the Kirov region: A – 07.05.2011, B – 16.05.2011, C – 26.07.2011, D – 11.08.2011

и NDWI позволяют наиболее достоверно определить границы водохранилища по сравнению с индексом цвета воды (рис. 1, см. цв. вкладку). На значения индекса цвета воды, вероятно, повлияли высокие мутность и цветность воды, характерные для изучаемых водохранилищ. Значения цветности воды находились в диапазоне от 42 в Чернохолуницком водохранилище до 398 градусов цветности – в Большом Кирсинском. Величина мутности в большинстве исследуемых проб превышала 8 единиц мутности по формазину.

При сравнении значений спектральных индексов, рассчитанных для весенних и летних снимков по четырём водохранилищам Кировской области, обнаружено, что в летний период максимальные значения индексов и их диапазон больше, чем в весенний период (табл.). Такая разница в значениях может быть связана с влиянием мутности воды, а также с развитием высших водных растений и фитопланктона в летний период в поверхностном слое воды. В работе [8] отмечают, что чем выше величина мутности, тем ниже коэффициент отражения водной поверхности.

Мутность воды – один из основных показателей качества воды. Известно, что в периоды интенсивного развития фитопланктона, а также при образовании большого количества детрита в воде эвтрофных водоёмов в период вегетации мутность воды возрастает [12]. Расчёт индекса мутности позволяет регистрировать временные и пространственные изменения в водоёме по этому показателю. При построении индексных карт четырёх водохранилищ Кировской области было отмечено, что на снимках, сделанных 07.05.2011 и 16.05.2011 значения мутности для Белохолуницкого, Большого Кирсинского и Чернохо-

луницкого водохранилищ очень близки между собой. При этом на разных участках акватории каждого из водоёмов изменений в значении индексов не выявлено. В верховье Омутнинского водохранилища зафиксировано повышенное значение индекса мутности по сравнению с центральным и приплотинным участками водоёма, что согласуется с данными полевых исследований. При этом величина индекса мутности в этом водохранилище ниже, чем в других объектах исследования (рис. 2, см. цв. вкладку). Увеличение мутности в течение весенне-летнего сезона отмечено только в Омутнинском водохранилище, единственном из четырёх водоёмов, где в 2011 г. было зарегистрировано интенсивное «цветение» воды.

О степени эвтрофирования водного объекта можно судить по развитию фитопланктона и высших водных растений, которые можно определить, рассчитав индекс концентрации хлорофилла *a*. При построении индексных карт водохранилищ Кировской области по этому показателю было отмечено, что наибольшие изменения значений индекса в течение весенне-летнего сезона отмечены в Чернохолуницком водохранилище (рис. 3, см. цв. вкладку).

Максимальные значения индекса концентрации хлорофилла *a* во всех объектах исследования зафиксированы на снимке, сделанном 16.05.2011, минимальные – 13.08.2011. При анализе индексных карт отмечено, что максимальные значения соответствуют участкам акватории, занятым зарослями высших водных растений (Омутнинское водохранилище) и мелководным участкам с замедленным водообменом (Омутнинское, Белохолуницкое водохранилища). Для первого водоёма отмечено, что максимальные значения

Таблица / Table
Значения спектральных индексов крупнейших водохранилищ Кировской области в 2011 г.
The values of the spectral indices of the largest reservoirs in the Kirov region in 2011

Водоохранилище Reservoir	NDWI	NDVI	Индекс цвета Color index
Белохолуницкое Belokholunitskoye	<u>-0,1–0,22</u> -0,1–0,5	<u>-0,3–0</u> -0,15–0,5	<u>0,32–1,5</u> 0,34–2,7
Омутнинское Omutninskoye	<u>-0,1–0,48</u> -0,1–0,52	<u>-0,28–0</u> -0,2–0,5	<u>0,42–1,4</u> 0,35–3
Большое Кирсинское Bol'shoye Kirsinskoye	<u>-0,1–0,48</u> –	<u>-0,1–0,25</u> –	<u>0,9–1,6</u> –
Чернохолуницкое Chernokholunitskoye	<u>-0,1–0,37</u> -0,1–0,62	<u>-0,14–0,3</u> -0,2–0,6	<u>0,32–1,55</u> 0,34–3

Примечание: над чертой указаны минимальные и максимальные значения индексов в весенний период, под чертой – в летний. Прочерк означает отсутствие данных.

Note: the minimum and maximum indices in the spring are indicated above the line, and in the summer under the line. A dash indicates a lack of data.

индекса концентрации хлорофилла *a* совпадают с максимальными значениями индекса мутности воды. В работе [5] отмечалось, что высокие показатели концентрации хлорофилла *a* свидетельствуют об обильном развитии фитопланктона, что зачастую является главной причиной повышенной мутности и цветности водных масс. Таким образом, индекс мутности можно использовать как один из признаков для выявления участков массового развития фитопланктона и высших растений.

Заключение

Для анализа состояния водных объектов в настоящее время используется большое количество спектральных индексов. Однако, из-за различных физико-химических условий в водоёмах и отличий в степени их эвтрофирования, для каждого конкретного водного объекта необходимо эмпирическим путём подбирать наиболее информативные индексы и осуществлять корректировку используемых для их расчёта формул, подбирать шкалу измерений. Водоохранилища Кировской области отличаются высокой цветностью и мутностью воды. Для выявления границ этих водных объектов наиболее информативными оказались индексы NDVI и NDWI. Отмечено, что в весенний период значения индексов цвета воды, NDVI и NDWI **ниже, чем в летний период**, что может быть связано как с развитием высших водных растений и фитопланктона, так и с изменением физико-химической характеристики водных объектов. Индексы мутности и концентрации хлорофилла *a* позволяют проводить оценку и сравнение степени развития фитопланктона, его пространственного распределения по акватории водоохранилищ Кировской области.

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

Авторы выражают благодарность Г. Я. Кантору, к.т.н., научному сотруднику Института биологии Коми НЦ УрО РАН за консультации по дешифрированию космических снимков.

Литература

1. Лаврова О.Ю., Соловьев Д.М., Строчков А.Я., Шендрик В.Д. Спутниковый мониторинг интенсивного цветения водорослей в Рыбинском водохранилище //

Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 3. С. 54–72.

2. Сластина Ю.Л., Ключкова М.А. Сезонная динамика фитопланктона оз. Четырехверстного // Водная среда и природно-территориальные комплексы: исследование, использование, охрана: Материалы IV шк.-конф. молодых учёных с междунар. участием. Петрозаводск, 2011. С. 121–123.

3. Balyuk T.V., Kutuzov A.V., Nazarenko O.G. Ecotone system of the southeastern coast of the Tsimlyansk Reservoir // Water Resources. 2007. V. 34. No. 1. P. 95–102.

4. Кутузов А.В. Оперативный спутниковый мониторинг скоплений планктонных водорослей и количественная оценка их плотности // Географический вестник. 2016. № 3 (38). С. 160–168.

5. 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 Ивановского водохранилища // Вестник ТвГУ. Серия «Химия». 2016. № 2. С. 230–244.

6. 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.

7. Кутявина Т.И., Домнина Е.А., Ашихмина Т.Я., Савиных В.П. Морфометрические, гидрохимические и биологические особенности водохранилищ Северо-Востока Кировской области // Теоретическая и прикладная экология. 2013. № 2. С. 50–55.

8. Катаев М.Ю., Бекеров А.А. Методика обнаружения водных объектов по многоспектральным спутниковым измерениям // Доклады ТУСУРа. 2017. Т. 20. № 4. С. 105–108.

9. Ji L., Zhang L., Wylie B. Analysis of dynamic thresholds for the Normalized Difference Water Index // Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. 2009. V. 75. No. 11. P. 1307–1317.

10. Sun F., Sun W., Chen J., Gong P. Comparison and improvement of methods for identifying waterbodies in remotely sensed imagery // International Journal of Remote Sensing. 2012. V. 33. No. 21. P. 6854–6875.

11. Адамович Т.А., Ашихмина Т.Я., Кантор Г.Я. Использование различных комбинаций спектральных каналов космических снимков спутника Landsat 8 для оценки природных сред и объектов (обзор) // Теоретическая и прикладная экология. 2017. № 2. С. 9–18.

12. Даценко Ю.С. Эвтрофирование водохранилищ. Гидролого-гидрохимические аспекты. М.: ГЕОС, 2007. 252 с.

References

1. Lavrova O.Yu., Solovov D.M., Strochkov A.Ya., Shendrik V.D. Satellite monitoring of color algae in the Rybinsk Reservoir // Sovremennye problemy distantsion-

nogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2014. V. 11. No. 3. P. 54–72 (in Russian).

2. Slastina Yu.L., Klochkova M.A. Seasonal dynamics of phytoplankton of lake Chetyrekhverstnogo // Water environment and natural-territorial complexes: research, use, protection: Materialy IV shk.-konf. molodykh uchenykh s mezhdunar. uchastiem. Petrozavodsk, 2011. P. 121–123 (in Russian).

3. Balyuk T.V., Kutuzov A.V., Nazarenko O.G. Ecotone system of the southeastern coast of the Tsimlyansk Reservoir // Water Resources. 2007. V. 34. No. 1. P. 95–102. doi: 10.1134/S0097807807010101

4. Kutuzov A.V. Operational satellite monitoring of accumulations of planktonic algae and quantitative assessment of their density // Geograficheskiy vestnik. 2016. No. 3 (38). P. 160–168 (in Russian). doi:10.17072/2079-7877-2016-3-160-168

5. 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).

6. 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

7. Kutuyavina T.I., Domnina E.A., Ashikhmina T.Ya., Savinikh V.P. Morphometric, hydro-chemical and biological characteristics of the ponds of the North-East of Kirov region // Theoretical and Applied Ecology. 2013. No. 2. P. 50–55 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2013-2-050-055

8. Kataev M.Yu., Bekerov A.A. Detection technique for water bodies using multispectral satellite measurements // Doklady TUSURa. 2017. V. 20. No. 4. P. 105–108 (in Russian). doi: 10.21293/1818-0442-2017-20-4-105-108

9. Ji L., Zhang L., Wylie B. Analysis of dynamic thresholds for the Normalized Difference Water Index // Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. 2009. V. 75. No. 11. P. 1307–1317. doi: 10.14358/PERS.75.11.1307

10. Sun F., Sun W., Chen J., Gong P. Comparison and improvement of methods for identifying waterbodies in remotely sensed imagery // International Journal of Remote Sensing. 2012. V. 33. No. 21. P. 6854–6875. doi: 10.1080/01431161.2012.692829

11. Adamovich T.A., Ashikhmina T.Ya., Kantor G.Ya. Use of various combinations of spectral channels of satellite images from the Landsat 8 satellite for an assessment of natural environments and objects (review) // Theoretical and Applied Ecology. 2017. No. 2. P. 9–18 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2017-2-009-018

12. Datsenko Yu.S. Eutrophication of reservoirs. Hydrological and hydrochemical aspects. Moskva: GEOS, 2007. 252 p. (in Russian).