

in an increase in reflectance values in the visible and near-IR ranges. It was experimentally established that the areas of development of air-water vegetation are manifested in the excess of reflectivity values in the near-IR range (5th channel of the Landsat-8 satellite (845—885 nm)) over the red one (4th channel (630—680 nm)).

Keywords: boundaries of water bodies, aquatic vegetation, Earth remote sensing, Landsat.

For citation: *A.V. Bocharov, I.N. Mezheumov, P.M. Pakhomov, S.D. Khizhnyak, O.A. Tikhomirov, S.I. Bidenko, P.N. Kravchenko. Territorial differentiation of water and terrestrial geosystems using data from space sensors. Gidrometeorologiya i Ekologiya. Journal of Hydrometeorology and Ecology. 2021, 65: 726—737. [In Russian]. doi: 10.33933/2713-3001-2021-65-726-737*

Введение

Для исследования водоемов, в особенности прибрежных экотонных зон, существует необходимость точного выделения действительных границ береговой линии. Экотон представляет собой переход между двумя и более различными группировками [1] — они имеют существенное значение в сохранении биоразнообразия и важны для изучения. Экотонная зона между сушей и водой зачастую занята водной растительностью, и это усложняет выделение границ объектов. Воздушно-водная растительность может простираться на сотни метров от береговой линии. Водная растительность играет значительную роль в регулировании процессов, в занятых ей местах обитания. Она защищает береговые линии от эрозии, улавливает взвешенные твердые частицы, производит выделение большого количества углерода и азота. Выделение ареалов распространения водной растительности достаточно важная задача для оценки состояния, динамики развития и определения устойчивости экосистем водных объектов. Цель работы состоит в повышении эффективности определения границ водных объектов и выделении зон распространения воздушно-водной растительности по данным дистанционного зондирования Земли.

Опыт применения данных дистанционного зондирования для выделения границ водных объектов приводится в работах Студеникина А.В. [2], Кутузова А.В. [3], Катаева М.Ю. [4], Alesheikh A.A. [5], Nijland W. [6], Rasulya A. [7] и др. Исследованиям воздушно-водной растительности по данным дистанционного зондирования посвящены работы Власова Б.П. [8], Филоненко И.В. [9], Zhao D. [10], Sawaya K.E. [11], Midwood J.D. [12] и др.

Материалы и методы

Известны три основных способа определения границы водного объекта и зон распространения воздушно-водной растительности по многоспектральным данным дистанционного зондирования Земли: визуальное дешифрирование, сегментация изображений, классификация на основе индексных изображений [13].

1) *Выделение границ объектов с использованием визуального дешифрирования космических снимков.* Наиболее простой способ, не требующий специализированного программного обеспечения и квалификации оператора. Вместе с тем он отличается низкой точностью результатов и при больших размерах объектов достаточно трудоемкий.

2) *Использование алгоритмов сегментации изображений.* Возможны два алгоритма классификации, «без обучения» (ISODATA) [14] и «с обучением» (метод минимального расстояния, метод максимального правдоподобия, метод спектральной корреляции SAM и др.). Результаты сохраняются в виде тематических изображений, классы которых соотносят с группами объектов на земной поверхности. Применение данного способа позволяет получать результаты с высокой степенью автоматизации. К недостаткам следует отнести неконтролируемость результатов при использовании классификации без обучения, а так же сложность выбора подходящих параметров при использовании классификации с обучением.

3) *Применение индексных изображений,* получаемых путем обработки много-спектральных космических снимков. Наиболее популярными являются: нормализованный вегетационный индекс (NDVI) [15]; почвенный вегетационный индекс (SAVI) [16]; нормализованный разностный водный индекс (NDWI) [17] и др. На основании значений пикселей индексных изображений производится классификация объектов. Данный способ достаточно удобен и наиболее распространен. К тому же некоторые продукты ДДЗ поставляются с рассчитанными значениями NDVI. Но данный способ не позволяет контролировать классификацию, а также не эффективен при выделении экотонных зон между водной поверхностью и сушей.

Приведенные выше методики имеют существенные ограничения для исследования прибрежной экотонной зоны. Это подтолкнуло к поиску возможностей для повышения качества исследований. В результате экспериментальных изысканий была разработана методика, позволяющая повысить эффективность определения границ водных объектов и выделения зон распространения воздушно-водной растительности.

В данном исследовании источником данных дистанционного зондирования были многоспектральные снимки спутника Landsat-8. Это свободно распространяемые данные. Они размещаются в открытом доступе на серверах Геологической службы США. Перед использованием все снимки подвергались радиометрической калибровке и атмосферной коррекции и имели значения пикселей в виде коэффициентов отражения (r). Для реализации предлагаемой в статье методики могут быть использованы данные с других сенсоров производящих съемку поверхности Земли в красном и ближнем ИК-участках спектра.

Вода поглощает электромагнитное излучение в ИК диапазоне, поэтому данной участок спектра информативен для определения границы между сушей и водными объектами, которая не очевидно различима в видимом свете. Для Landsat-8 наилучший контраст водной поверхности и суши имеет 5-й канал (845—885 нм) (рис. 1). Для определения границ (создания маски) водоема предлагается использовать разделение пикселей снимка в этой спектральной зоне по значению отражательной способности на группы (вода и суша) [18].

Расчет порогового значения между группами пикселей предлагается производить на основе профилей переходной зоны. Для расчета порогового значения при помощи ГИС-редактора составляется несколько графиков профилей прибрежной зоны в ближнем ИК-диапазоне, содержащих береговую зону и водную поверхность (рис. 2 а). Использование нескольких профилей позволяет повысить

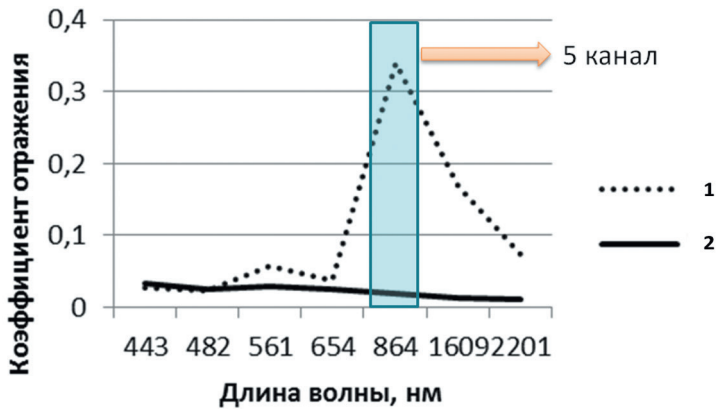


Рис. 1. Характерные коэффициенты отражения водной поверхности и суши (по снимку Landsat):

1 — луг, 2 — водохранилище.

Fig. 1. Typical reflection coefficients of the water surface and land (according to the Landsat image):

1 — meadow, 2 — reservoir.

репрезентативность получаемых данных. Еще более информативным для определения порогового значения между сушей и водоемом является использование распределения значений отражательной способности пикселей для полигонального участка прибрежной зоны (рис. 2 в). Этот подход отличается большей трудоемкостью, поэтому в заявленном способе он предлагается как дополнительный. На рисунках 2 б и 2 в наблюдаем, что пиксели космического снимка, соответствующие водной поверхности, имеют низкие значения коэффициента отражения, в то время как пиксели, соответствующие суше, характеризуются более высокой отражательной способностью.

Опытным путем установлено, что в большинстве случаев для Европейской части России пороговое значение коэффициента отражения (для спектральной зоны, соответствующей 5 каналу сенсора Landsat 8) между пикселями спутниковых снимков, соответствующих суши и водной поверхности, составляет около 0,15.

$$r_{845-885} < 0,15 \text{ — водная поверхность} \quad (1)$$

$$r_{845-885} \geq 0,15 \text{ — суша}$$

При необходимости адаптации заявляемого способа для других территорий, либо при использовании других алгоритмов атмосферной коррекции, пороговое значение может быть откорректировано, чтобы соответствовать местным условиям. При этом следует учитывать, что оно должно находиться в интервале от 0,1 до 0,2. Значение коэффициента отражения пикселя спутникового снимка ниже 0,1 однозначно относит его к чистой водной поверхности, а значение выше 0,2 — к суше. При этом пиксели, имеющие отражательную способность, меньше порогового показателя, интерпретируются как поверхность, занятая водой и водной растительностью.

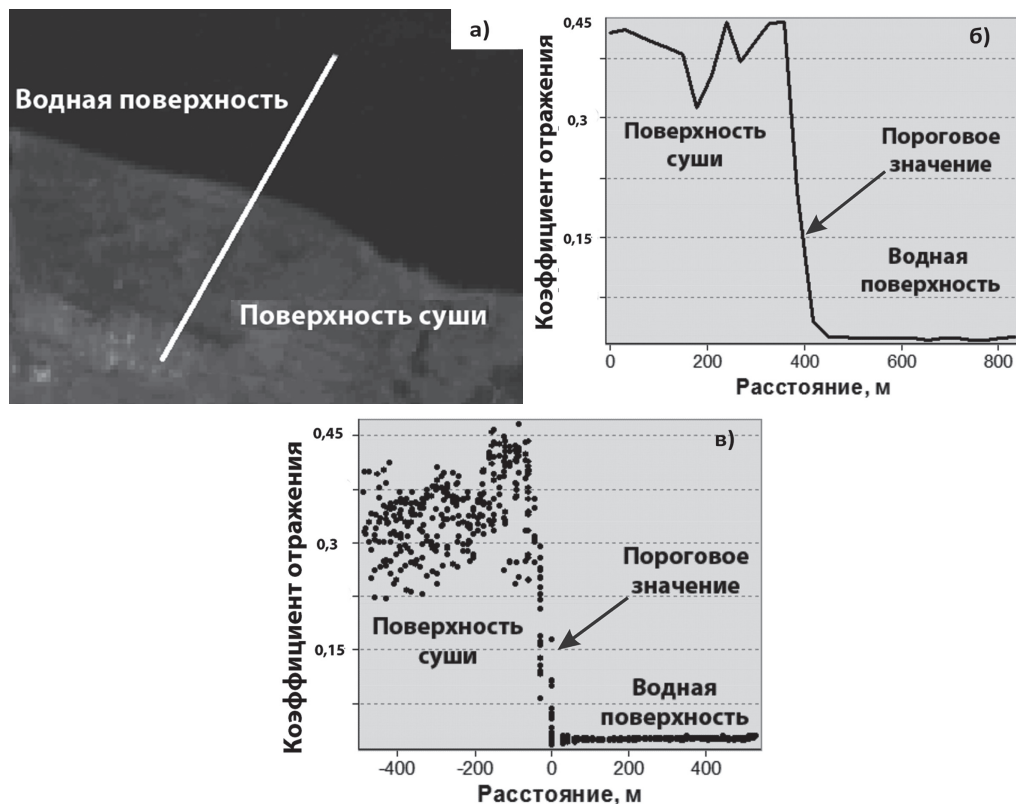


Рис. 2. Пример расчета границ водоема на основе деления пикселей ИК-канала по пороговому значению коэффициентов отражения:

- а) профиль прибрежной зоны на снимке Landsat в ИК-канале;
- б) график значений коэффициентов отражения прибрежной зоны в ИК-канале;
- в) пример распределения значений пикселей на участке прибрежной зоны в ИК-канале.

Fig. 2. An example of calculating the boundaries of a reservoir based on the division of pixels of the IR channel based on the threshold value of the reflection coefficients:

- а) the profile of the coastal zone in the Landsat image in the IR channel;
- б) a graph of the values of the reflection coefficients of the coastal zone in the IR channel;
- в) an example of the distribution of pixel values in the coastal zone in the IR channel.

Воздушно-водная растительность, как правило, располагается в прибрежной мелководной зоне, и задача ее определения по данным космической съемки сводится к поиску соответствующих ей пикселей из общего числа пикселей водного объекта. Идентификация данных зон во внутренних водоемах усложняется большим количеством примесей в водах, что делает спектры отражения водных масс и отражения водной растительности сходными. В ходе проведенных исследований на основании космических снимков и многократных полевых обследований Ивановского водохранилища были выявлены индивидуальные спектральные

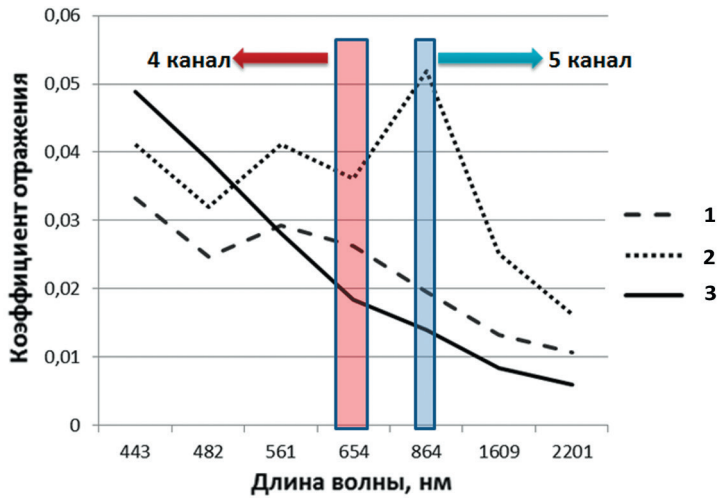


Рис. 3. Коэффициенты отражения водной поверхности и воздушно-водной растительности: 1 — водохранилище; 2 — воздушно-водная растительность; 3 — чистая морская вода.

Fig. 3. Reflection coefficients of water surface and air-water vegetation: 1 — reservoir; 2 — air-water vegetation; 3 — clean sea water.

характеристики зон развития воздушно-водной растительности. Исследования показали, что присутствие водной растительности проявляется в повышении значений отражательной способности в видимом и ближнем ИК диапазонах (рис. 3). Для Landsat-8 наиболее значительное увеличение отражательной способности наблюдается в 5 канале.

Общее увеличение отражательной способности водной поверхности может быть обусловлено повышением концентрации хлорофилла либо показателя мутности. Поэтому для определения ареалов распространенности воздушно-водной растительности эффективным оказалось использование сравнительной оценки значений пикселей снимков в ближнем ИК диапазоне относительно красного участка спектра. Экспериментально установлено, что участки развития воздушно-водной растительности проявляются в превышении значений отражательной способности в ближнем ИК (5 канал Landsat-8 (845—885 нм)) над красным (4 канал Landsat-8 (630—680 нм)).

Для выделения ареалов воздушно-водной растительности необходимо эффективно оценивать наклон спектра отражения на участке 630—885 нм. Для этого предлагается использовать коэффициент, характеризующий угол наклона спектра (k), который рассчитывается по следующей формуле:

$$k = r_{630-680} / r_{845-885} \quad (2)$$

если $k < 1$, то значения пикселя относятся к воздушно-водной растительности, если $k \geq 1$, то значения пикселя относятся к водной поверхности, не покрытой воздушно-водной растительностью.

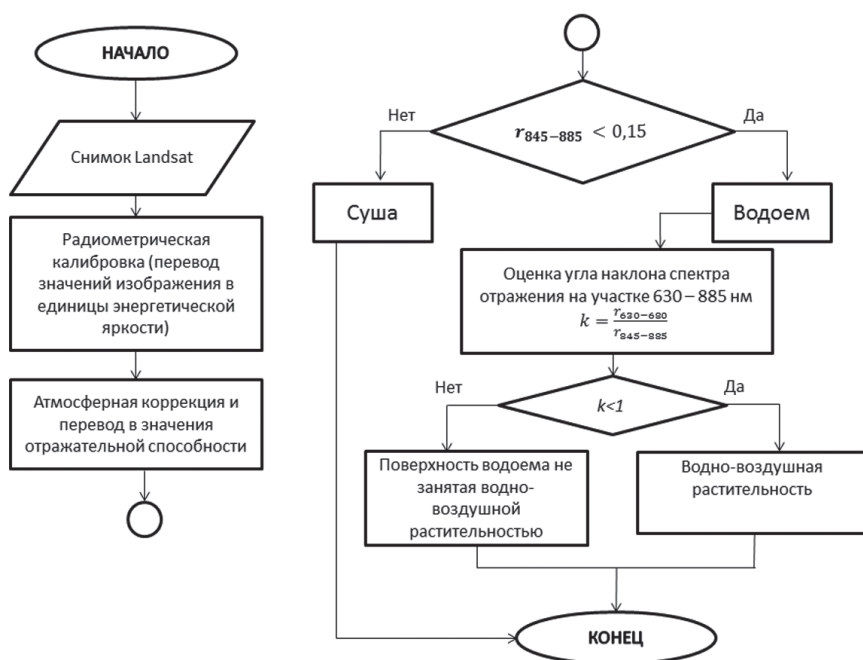


Рис. 4. Алгоритм определения зон распространения воздушно-водной растительности по данным дистанционного зондирования Земли.

Fig. 4. Algorithm for determining the distribution zones of air-water vegetation according to Earth remote sensing data.

Общая схема алгоритма, предлагаемого для выделения областей распространения воздушно-водной растительности по данным Landsat-8, представлена на рис. 4.

Результаты исследований

Определение границ водной поверхности Иваньковского водохранилища проводилось по снимку Landsat 8 от 4 июля 2015 г. Для повышения точности результатов на основе панхроматического канала Landsat-8 выполнялось увеличение разрешения снимков с 30 м/пиксель до 15 м/пиксель. После повышения разрешения снимки подвергались радиометрической калибровке и атмосферной коррекции на основе модели пропускания излучения атмосферой MODTRAN (MODerate resolution atmospheric TRANsmission), а затем переводу к виду коэффициентов отражательной способности от 0 до 1.

На основании разработанного алгоритма были выделены границы Иваньковского водохранилища (рис. 5) и участки распространения воздушно-водной растительности в его акватории (рис. 6). Для данного водоема характерно почти повсеместное развитие воздушно-водной растительности в прибрежной зоне.



Рис. 5. Границы водных объектов, выделенные по снимку Landsat (Иваньковское водохранилище и близлежащие водоемы).

Fig. 5. Boundaries of water bodies highlighted by the Landsat image (Ivankovskoe reservoir and nearby water bodies).



Рис. 6. Пример выделения по космическому снимку Landsat-8 областей распространения воздушно-водной растительности (4 июля 2015 г., Волжский плес, район пос. Старое Мелково):

1 — водная поверхность без воздушно-водной растительности; 2 — участки развития воздушно-водной растительности.

Fig. 6. An example of identifying areas of distribution of air-water vegetation based on the Landsat-8 satellite image (July 4, 2015, Volzhsky reach, area of the village of Staroe Melkovo):

1 — water surface without air—water vegetation; 2 — areas of development of air-water vegetation.

На момент исследования площадь водохранилища составляла 229,6 км², а площадь, занятая воздушно-водной растительностью — 27,4 км². Согласно полученным результатам, распространение воздушно-водной растительности составляет 12 % от площади водохранилища. Морфометрические данные по отдельным частям водоема приводятся в табл. 1.

Таблица 1

Морфометрические характеристики Иваньковского водохранилища
(по данным Landsat 8)

Morphometric characteristics of the Ivankovskoe reservoir (according to Landsat 8)

Плес	Площадь, км ²	Длина береговой линии (с островами), км	Площадь, занятая воздушно-водной растительностью, км ²	Доля поверхности водоема, занятой воздушно-водной растительностью, %
Волжский	65,6	454	9,1	13,9
Шошинский	62,9	425	9,4	14,9
Иваньковский	101,1	354	8,9	11,3
Весь водоем	229,6	1233	27,4	11,9

Заключение

Предлагаемая методика может стать хорошим инструментом для камеральной обработки данных дистанционного зондирования. Выделение границ водоема можно использовать для оценки прохождения паводков и половодий, уточнения кадастровых карт и других задач. Применение предлагаемой методики выделения воздушно-водной растительности позволяет получать оперативные сведения и вести мониторинг трансформации аквальных комплексов. Это особенно актуально для равнинных водохранилищ, в которых в течение десятилетий после затопления происходят процессы развития водной растительности.

Точность выделения объектов ограничивается размером пикселей космических снимков. Для Landsat-8 при использовании панхроматического канала она составляет 15 м. Точность отнесения пикселя к классу (вода — суша — воздушно-водная растительность) зависит от порогового значения пикселей в спектральной полосе 845—885 нм и от значения коэффициента, характеризующего наклон спектра отражения на участке 630—885 нм, которые могут при необходимости быть скорректированы под местные условия или съемочную аппаратуру.

Следует отметить, что проведенные исследования показали, что содержание взвесей и растворенных веществ в водах большинства внутренних водоемов не позволяют использовать данные дистанционного зондирования для получения устойчивых результатов при определении водной растительности полностью погруженной в воду. Поэтому при необходимости проведения экологических исследований водоема дистанционными методами предлагается ограничиваться только определением воздушно-водной растительности.

На разработанные методики был получен патент на изобретение № 2750853 «Способ выделения границ водных объектов и ареалов распространения

воздушно-водной растительности по многоспектральным данным дистанционного зондирования Земли» [19].

Список литературы

1. *Одум Ю.* Основы экологии. М.: Мир, 1975. 740 с.
2. *Студеникин А.В., Филиппов О.В.* Автоматизированные технологии обработки материалов ДЗЗ в комплексном мониторинге Волгоградского водохранилища // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8, № 3. С. 192—198.
3. *Кутузов А.В.* Использование данных дистанционного зондирования для мониторинга систем «вода—суша» на равнинных водохранилищах (на примере Цимлянского водохранилища) // Исследование Земли из космоса. 2011. № 6. С. 64—72.
4. *Катаев М.Ю., Бекеров А.А.* Методика обнаружения водных объектов по многоспектральным спутниковым измерениям // Доклады ТУСУРа. 2017. Т. 20, № 4. С. 105—108.
5. *Alesheikh A.A., Ghorbanali A., Nouri N.* Coastline change detection using remote sensing // Int. J. Environ. Sci. Tech. 2007. Issue 4 (1). P. 61—66.
6. *Nijland W., Reshitnyk L., Rubidge E.* Satellite remote sensing of canopy-forming kelp on a complex coastline: a novel procedure using the Landsat image archive // Remote Sensing of Environment. 2018. Issue 220. P. 41—50. doi: 10.1016/j.rse.2018.10.032.
7. *Rasulya A., Naghdifar R., Rasoli M.* Monitoring of Caspian Sea Coastline Changes Using Object-Oriented Techniques // Procedia Environmental Sciences. 2010. Issue 2. P. 416—426. doi: 10.1016/j.proenv.2010.10.046.
8. *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): сборник научных статей. Минск, 2019. С. 254—258.
9. *Филоненко И.В., Комарова А.С.* Многолетняя динамика площади зарастания прибрежно-водной растительностью оз. Воже // Принципы экологии. 2015. № 4. С. 63—72.
10. *Zhao D., Jiang H., Yang T., Cai Y., Xu D., An S.* Remote sensing of aquatic vegetation distribution in Taihu Lake using an improved classification tree with modified thresholds // Journal of Environmental Management. 2012. Vol. 95, Issue 1. P. 98—107. doi: 10.1016/j.jenvman.2011.10.007.
11. *Sawaya K.E., Olmanson L.G., Heinert N.J., Brezonik P.L., Bauer M.E.* Extending satellite remote sensing to local scales: land and water resource monitoring using high-resolution imagery // Remote Sensing of Environment. 2003. Issue 88. P. 144—156. doi: 10.1016/j.rse.2003.04.006.
12. *Midwood J.D., Chow-Fraser P.* Mapping Floating and Emergent Aquatic Vegetation in Coastal Wetlands of Eastern Georgian Bay, Lake Huron, Canada // Wetlands. 2010. Issue 30. P. 1141—1152. doi: 10.1007/s13157-010-0105-z.
13. *Чичкова Е.Ф., Кондратьев С.А., Рыжиков Д.М., Тимофеев А.С., Шмакова М.В.* Идентификация типов подстилающей поверхности по данным спутниковой съемки Landsat с целью оценки биогеографической нагрузки на финский залив // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2016. № 43. С. 246—254.
14. *Ball G.H., Hall D.J.* Isodata: a method of data analysis and pattern classification. Stanford Research Institute, 1965.
15. *Kriegler F.J., Malila W.A., Nalepka R.F., Richardson W.* Preprocessing transformations and their effects on multispectral recognition // Sixth International Symposium on Remote Sensing of Environment, University of Michigan, Ann Arbor, MI. 1969. P. 97—131.
16. *Huete A.R.* A soil-adjusted vegetation index (SAVI) // Remote Sensing of Environment. 1988. Vol. 25, Issue 3. P. 295—309. doi: 10.1016/0034-4257(88)90106-X.
17. *Gao B.* NDWI — A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space // Remote Sensing of Environment. 1996. Vol. 58, Issue 3. P. 257—266. doi: 10.1016/S0034-4257(96)00067-3.
18. *Бочаров А.В., Тихомиров О.А.* Использование данных дистанционного зондирования для оценки изменений прибрежной зоны водохранилищ // Известия Самарского научного центра РАН. 2015. Т. 17, № 4(4). С. 625—632.

19. Бочаров А.В., Межеумов И.Н., Пахомов П.М., Хижняк С.Д., Тихомиров О.А. Способ выделения границ водных объектов и ареалов распространения воздушно-водной растительности по многогоспектральным данным дистанционного зондирования Земли: МПК G01N 21/25. Патент РФ, № 2020128629. 2020.

References

1. Odum Y. Fundamentals of Ecology. Moscow: Mir, 1975: 740 p. [In Russian].
2. Studenikin A.V., Filippov O.V., Automated technologies for processing remote sensing data in the integrated monitoring of the Volgograd reservoir. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniia Zemli iz kosmosa*. Modern problems of remote sensing of the Earth from space. 2011, 8, 3: 192—198. [In Russian].
3. Kutuzov A.V. Using remote sensing data for monitoring water-land systems on lowland reservoirs (on the example of the Tsimlyansk reservoir). *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. Earth Research from Space. 2011, 6: 64—72. [In Russian].
4. Kataev M.Y., Bekerov A.A. Methods of detecting water bodies by multispectral satellite measurements. *Doklady TUSURa*. Reports of TUSUR. 2017, 20, 4: 105—108 [In Russian].
5. Alesheikh A. A., Ghorbanali A., Nouri N. Coastline change detection using remote sensing. *Int. J. Environ. Sci. Tech.* 2007, 4 (1): 61—66.
6. Nijland W., Reshitnyk L., Rubidge E. Satellite remote sensing of canopy-forming kelp on a complex coastline: a novel procedure using the Landsat image archive. *Remote Sensing of Environment*. 2018, 220: 41—50. doi: 10.1016/j.rse.2018.10.032.
7. Rasulya A., Naghdifar R., Rasoli M. Monitoring of Caspian Sea Coastline Changes Using Object-Oriented Techniques. *Procedia Environmental Sciences*. 2010, 2: 416—426. doi: 10.1016/j.proenv.2010.10.046.
8. Vlasov B.P., Grishchenkova N.D., Sivenkov A.Y. Geoecological information content of Earth remote sensing data in the study of higher aquatic vegetation. *Sovremennoe sostoianie i perspektivy razvitiia osobo okhraniaemykh prirodnykh territorii (OOPT): sbornik nauchnykh statei*. Current state and development prospects of specially protected natural areas (SPNA): collection of scientific articles. Minsk, 2019: 254—258 [In Belarus].
9. Filonenko I.V., Komarova A.S. Long-term dynamics of the area of overgrowing with coastal aquatic vegetation of the lake Vozhe. *Printsipy ekologii*. Principles of Ecology. 2015, 4: 63—72 [In Russian].
10. Zhao D., Jiang H., Yang T., Cai Y., Xu D., An S. Remote sensing of aquatic vegetation distribution in Taihu Lake using an improved classification tree with modified thresholds. *Journal of Environmental Management*. 2012, 95, 1: 98—107. doi: 10.1016/j.jenvman.2011.10.007.
11. Sawaya K.E., Olmanson L.G., Heinert N.J., Brezonik P.L., Bauer M.E. Extending satellite remote sensing to local scales: land and water resource monitoring using high-resolution imagery. *Remote Sensing of Environment*. 2003, 88: 144—156. doi: 10.1016/j.rse.2003.04.006.
12. Midwood J.D., Chow-Fraser P. Mapping Floating and Emergent Aquatic Vegetation in Coastal Wetlands of Eastern Georgian Bay, Lake Huron, Canada. *Wetlands*. 2010, 30: 1141—1152. doi: 10.1007/s13157-010-0105-z.
13. Chichkova E.F., Kondratyev S.A., Ryzhikov D.M., Timofeev A.S., Shmakova M.V. Identification of the land surface types on Landsat satellite data to assess the nutrient load on the Gulf of Finland. *Uchenye zapiski Rossiiskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta*. Scientific Notes of the Russian State Hydrometeorological University. 2016, 43: 246—254 [In Russian].
14. Ball G.H., Hall D.J. *Isodata: a method of data analysis and pattern classification*. Stanford Research Institute. 1965.
15. Kriegler F.J., Malila W.A., Nalepka R.F., Richardson W. Preprocessing transformations and their effects on multispectral recognition. Sixth International Symposium on Remote Sensing of Environment, University of Michigan, Ann Arbor, MI. 1969: 97—131.
16. Huete A.R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*. 1988, 25, 3: 295—309. doi: 10.1016/0034-4257(88)90106-X.
17. Gao B. NDWI — A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*. 1996, 58, 3: 257—266. doi: 10.1016/S0034-4257(96)00067-3.

18. *Bocharov A.V., Tikhomirov O.A.* Using remote sensing data to assess changes in the coastal zone of reservoirs. *Izvestiia Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*. Izvestia of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2015, 17, 4 (4): 625—632 [In Russian].
19. *Bocharov A.V., Mezheumov I.N., Pakhomov P.M., Khizhnyak S.D., Tikhomirov O.A.* Method for determining the boundaries of water bodies and areas of distribution of semi-aquatic species based on multispectral data of remote sensing of the Earth: МРК G01N 21/25. Patent RF, no. 2020128629, 2020. [In Russian].

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 24.05.2021

Принята к публикации после доработки 26.10.2021

Сведения об авторах

Бочаров Александр Вячеславович, ассистент кафедры физической географии и экологии ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет», bochalex@bk.ru.

Межеумов Игорь Николаевич, канд. хим. наук, ведущий инженер отдела сопровождения проектной деятельности УНИ ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет», Mezheumov.IN@tversu.ru.

Пахомов Павел Михайлович, д-р хим. наук, проф., заведующий кафедрой физической химии ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет», pavel.pakhomov@mail.ru.

Хижняк Светлана Дмитриевна, канд. хим. наук, доцент кафедры физической химии ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет», sveta_khizhnyak@mail.ru.

Тихомиров Олег Алексеевич, д-р геогр. наук, доцент, зав. кафедрой физической географии и экологии ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет», tikhomirovoa@mail.ru.

Биденко Сергей Иванович, д-р техн. наук, профессор, советник генерального конструктора, ПАО «Интелтех», BidenkoSI@inteltech.ru.

Кравченко Павел Николаевич, канд. геогр. наук, зам. проректора по научной работе, Московский университет им. С.Ю. Витте, Pkravchenko@muiv.ru.

Information about authors

Bocharov Alexander Vyacheslavovich, Assistant, Department of Physical Geography and Ecology, “Tver State University”.

Mezheumov Igor Nikolaevich, PhD (Chem. Sci.), Leading Engineer, Project Support Department, Scientific Research Directorate, “Tver State University”.

Pakhomov Pavel Mikhailovich, Grand PhD (Chem. Sci.), Prof., Head of the Department of Physical Chemistry, “Tver State University”.

Khizhnyak Svetlana Dmitrievna, PhD (Chem. Sci.), Associate Professor, Department of Physical Chemistry, “Tver State University”.

Tikhomirov Oleg Alekseevich, Grand PhD (Geog. Sci.), Associate Professor, Head of Department of Physical Geography and Ecology, “Tver State University”.

Bidenko Sergey Ivanovich, Grand PhD (Tech. Sci.), Professor, Adviser on General Designer, PAO “Inteltech”.

Kravchenko Pavel Nikolaevich, PhD (Geog. Sci.), deputy Vice-rector for research, Moscow University named after S.Yu. Witte.