

## Использование спектральных показателей в определении термокарстовых озер по данным дистанционного зондирования

© 2021 г. — А.Е. Пшеничников

Институт наук о Земле, Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия; a.e.pshenichnikov@utmn.ru

Поступила 22.03.2021 г.

Принята к печати 01.06.2021 г.

**Ключевые слова:** спектральные показатели, AWEI, MNDWI, NDVI, NDWI, TCW, WRI, космические снимки, дешифрирование, термокарстовые озера.

**Аннотация:** Представлены результаты применения шести спектральных показателей (AWEI, MNDWI, NDVI, NDWI, TCW, WRI) для выделения термокарстовых озер в тундровых ландшафтах севера Якутии. Для оценки точности дешифрирования озер проводился расчет средней квадратической ошибки (СКО). Минимальное значение СКО равно 0,11 км<sup>2</sup> и соответствует индексу NDWI. Практически идентичный результат (0,12 км<sup>2</sup>) у индекса WRI, чуть хуже (0,15 км<sup>2</sup>) у индекса NDVI. Самую высокую среднюю квадратическую ошибку имеет индекс MNDWI (7,02 км<sup>2</sup>). Визуальный анализ также показал лучшее дешифрирование водоемов с помощью индексов NDWI, WRI и NDVI, что позволяет использовать указанные показатели для автоматического выделения водоемов.

*Для цитирования:* А.Е. Пшеничников. Использование спектральных показателей в определении термокарстовых озер по данным дистанционного зондирования // Геоинформатика. – 2021. – № 2. – С. 67–74. DOI: 10.47148/1609-364X-2021-2-67-74.

## Use of water indices in the determination of thermokarst lakes according to remote sensing data

© 2021 г. — А.Е. Pshenichnikov

Institute of Earth Sciences, State University of Tyumen, Tyumen, Russia; a.e.pshenichnikov@utmn.ru

Resieved 22.03.2021

Accepted for publication 01.06.2021

**Key words:** spectral indices, AWEI, MNDWI, NDVI, NDWI, TCW, WRI, space images, interpretation, thermokarst lakes

**Abstract:** The results of application of six spectral indices (AWEI, MNDWI, NDVI, NDWI, TCW, WRI) for the isolation of thermokarst lakes in tundra landscapes of northern Yakutia are presented. To assess the accuracy of decryption of lakes, an average quadratic error (MSE) was calculated. The minimum MSE value is 0.11 km<sup>2</sup> and corresponds to the NDWI index. An almost identical result (0.12 km<sup>2</sup>) is found in the WRI index, slightly worse (0.15 km<sup>2</sup>) one — in the NDVI index. An MNDWI index has the highest mean square error (7.02 km<sup>2</sup>). Visual analysis also showed better decryption of water bodies using the NDWI, WRI and NDVI indices, which allows the use of these indices for automatical isolation water bodies.

*For citation:* Pshenichnikov A.E. Use of water indices in the determination of thermokarst lakes according to remote sensing data. *Geoinformatika*. 2021;(2):67–74. DOI: 10.47148/1609-364X-2021-2-67-74. In Russ.

### Введение

В последние года в Арктике происходят значительные изменения. Повышение среднегодовой температуры воздуха приводит к таянию небольших арктических ледников [20], увеличению стока рек, более продолжительному сезону открытой воды [13]. При этом, изменение состояния вечной мерзлоты должно в первую очередь сказаться на процессах термокарста, в частности, на распространении термокарстовых озер, которые можно рассматривать как индикатор протаивания мерзлого грунта [2].

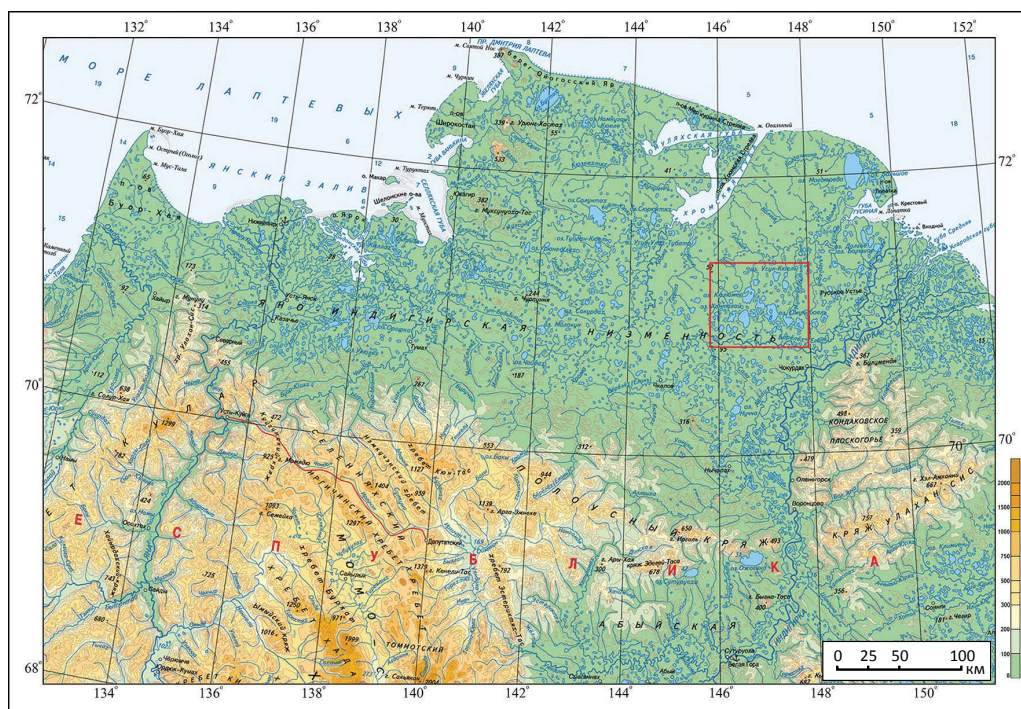
Космические снимки давно стали важным, а зачастую, единственным, источником информации для мониторинга краткосрочных и долгосрочных изменений, которые происходят в труднодоступ-

ных районах Арктики. Невозможность проведения больших по объему и охвату наземных исследований только подчеркивает важность данных дистанционного зондирования и поднимает вопрос четкого, детального и безошибочного дешифрирования границ водоемов — особенно в районах, где количество озер исчисляется сотнями и тысячами.

Несмотря на то, что в литературе описан ряд водных индексов, каждый из которых имеет свои сильные и слабые стороны, не существует четких правил их использования. Например, для термокарстовых озер надо выбирать один индекс, для лесостепных другой, для полупустынь третий, для районов с активной застройкой — четвертый, какой индекс лучше для водоемов с мутной водой, какой для водоемов с прозрачной водой и т.д.

Рис. 1. Местоположение района исследования.

Fig. 1. Location of the area under study



Обычно в исследованиях либо применяется один спектральный показатель, либо их число не более трех-четырех. Особо хотелось бы отметить статью, посвященную оценке методов выявления поверхностных вод в Сахеле, в которой авторы анализируют пятнадцать показателей [16].

В нашей статье рассматривается эффективность применения шести спектральных показателей для автоматизированного выделения водоемов в тундровых ландшафтах севера Якутии.

### Территория работ

Территория работ расположена в пределах Аллаиховского улуса республики Саха (Якутия). В физико-географическом отношении район исследования представляет собой восточную часть Яно-Индибирской низменности (рис. 1), левобережье реки Бөрёлөх — территорию со сплошным распространением многолетнемерзлых пород, среднегодовой температурой пород от  $-7^{\circ}\text{C}$  до  $-9^{\circ}\text{C}$ , льдистостью более 40 % [7]. Рельеф поверх-



Рис. 2. Исследуемые озера

Fig. 2. Lakes under study

1 — Омук-Кюель (Бакыл), 2 — Хаптагай (Сагарычье), 3 — Кюлюмер, 4 — Сангырыачча (Уолар-Кюель), 5 — Сымытыр, 6 — Бакыл, 7 — Будуннай (Мутное), 8 — Кырбыт (вместе с оз. Бас-Кюель), 9 — Усун-Кюель, 10 — Алексейчан, 11 — Улахан-Джара-Кюель, 12 — Кенде-Кюель (Уолбут), 13 — Урасалах, 14 — Эриек, 15 — Эдиганова (Кыра-Уолар-Кюель), 16 — Уэся-Кыллах, 17 — Островное, 18 — Проточное (Муксуновка), 19 — Турпаннах, 20 — Мутнинское (Протаинное), 21 — Оголох.

1 — Omuk-Kyuel (Bakyl), 2 — Khaptagay (Sagarychye), 3 — Kyulumer, 4 — Sangryachcha (Walar-Kyuel), 5 — Symytyr, 6 — Bakyl, 7 — Budunay (Mutnoe), 8 — Kirbyt (together with Lake Bas-Kyuel), 9 — Usun-Kyuel, 10 — Alekseychan, 11 — Ulakhan-Jara-Kyuel, 12 — Kende-Kyuel (Walbut), 13 — Urasalakh, 14 — Eriek, 15 — Ediganova (Kyr-Walar-Kyuel), 16 — Uesya-Kyllakh, 17 — Ostrovnoe, 18 — Protochnoe (Muksunovka), 19 — Turpannah, 20 — Mutninskoe (Protainnoe), 21 — Ogolokh.

ности выровненный, толща четвертичных отложений представлена озерно-аллювиальными осадками. Абсолютная высота варьирует от 2 до 60 м. Среднегодовая температура –13,4 °С, летом +8 °С, зимой –32,7 °С, среднегодовое количество осадков 205 мм.

Согласно мерзлотно-ландшафтному районированию [6] участок относится к Нижнеиндигирской озерно-термокарстовой провинции Северо-Восточной Сибири. Преобладают интразональные тундровые ландшафты – тундроболота полигонально-валиковые, аласный тип местности. На вытянутом возвышенном участке, ограниченном озерами Омук-Кюель (Бакыл) с юга, Эдиганова (Кыра-Уолар-Кюель) и Кенде-Кюель (Уолбут) с запада и Усун-Кюель и Кырбыт с северо-востока, преобладает типичная кустарничково-лишайниковая и моховая тундра. Основными криогенными процессами на исследуемой территории являются термокарст, морозобойное растрескивание, пучение.

Общая площадь участка 3735 км<sup>2</sup>. В качестве тестовых были выбраны 21 озеро (рис. 2) с площадью водного зеркала более 10 км<sup>2</sup>.

### Материалы и методы

В исследовании был использован космический снимок Landsat 8 (сайт геологической службы США <https://earthexplorer.usgs.gov/>) от 1.09.2019 г. Характеристика спектральных каналов представлена в табл. 1. Первичная обработка снимка и автоматизированное дешифрирование посредством использования водных индексов проводились в геоинформационной системе QGIS.

Для выделения озер применялись следующие спектральные показатели:

AWEI<sub>nsh</sub> [14]

$$AWEI_{nsh} = 4 \times (Green - SWIR1) - (0,25 \times NIR + 2,75 \times SWIR2),$$

MNDWI [24]

$$MNDWI = \frac{Green - SWIR1}{Green + SWIR1},$$

NDVI [18], [21]

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red},$$

NDWI [19]

$$NDWI = \frac{Green - NIR}{Green + NIR},$$

TCW [11]

$$TCW = 0,1511 \times Blue + 0,1973 \times Green + 0,3283 \times Red + 0,3407 \times NIR + 0,7117 \times SWIR1 + 0,4559 \times SWIR2,$$

WRI [22]

$$WRI = \frac{(Green + Red)}{(NIR + SWIR1)}.$$

Необходимо остановиться на автоматизированном индексе выделения воды (AWEI). Этот индекс за счет использования пяти спектральных каналов позволяет максимизировать разделение

Табл. 1. Характеристика спектральных каналов Landsat-8 OLI

Tab. 1. Characteristics of the Landsat-8 OLI spectral bands

Спектральный канал	Длина волны, мкм	Разрешение, м
Band 1 (Coastal/Aerosol)	0,435 – 0,451	30
Band 2 (Blue)	0,452 – 0,512	30
Band 3 (Green)	0,533 – 0,590	30
Band 4 (Red)	0,636 – 0,673	30
Band 5 (NIR)	0,851 – 0,879	30
Band 6 (SWIR-1)	1,566 – 1,651	30
Band 7 (SWIR-2)	2,107 – 2,294	30
Band 8 (Pan)	0,503 – 0,676	15
Band 9 (Cirrus)	1,363 – 1,384	30

водных и неводных пикселей, для чего предлагают два отдельных уравнения [14]. Первое ( $AWEI_{nsh}$ ) указано ранее, второе ( $AWEI_{sh}$ ) приводим ниже.

$$AWEI_{sh} = Blue + 2,5 \times Green - 1,5 \times (NIR + SWIR1) - 0,25 \times SWIR2 .$$

Их использование заключается в следующем: 1) в ситуациях, когда тени являются основными источниками потери точности, но снег, лед и поверхности с высоким альбедо отсутствуют, предлагается только  $AWEI_{sh}$ ; 2) в областях, где тени не являются большой проблемой, предлагается только  $AWEI_{nsh}$ ; 3) в условиях, когда есть как поверхности с высоким альбедо, так и тени/темные поверхности, предлагается использовать оба уравнения последовательно; 4) в областях без затененных участков, без темного городского фона и без поверхностей с высоким альбедо можно использовать любое уравнение отдельно [14].

В работе был использован индекс  $AWEI_{nsh}$ , так как район исследования представляет собой участок без поверхностей с высоким альбедо, без городских или сельских территорий и применение второго индекса  $AWEI_{sh}$  будет избыточным.

Заострим внимание на правильности выбора спектральных каналов при использовании данного индекса. В первоисточнике [14] авторы применяют для расчета  $AWEI_{nsh}$  следующие каналы Landsat5: band2 (Green), band4 (NIR), band5 (SWIR) и band7 (SWIR2). В случае использования Landsat8 им соответствуют band3, band5, band6 и band7. Но, в тоже время, например, в [1] вместо SWIR2 в формуле расчета указан SWIR, в [16, 9] авторы используют SWIR1, а в [12] каналы SWIR1 и SWIR2 в формуле индекса перепутаны местами.

Оценка точности дешифрирования озер проводилась с помощью расчета средней квадратической ошибки:

$$m = \sqrt{\frac{\sum \Delta^2}{n}},$$

где  $\Delta$  — разница между площадью озера, полученной в результате использования водного индекса, и площадью, полученной в результате визуального дешифрирования (эталон). В качестве эталонного был выбран снимок Sentinel 2B от 01.09.2019 г. с пространственным разрешением 10 метров.

### Результаты исследования

По итогам визуального анализа результатов дешифрирования (рис. 3) можно отметить, что лучше всего себя показали индексы NDVI, NDWI, WRI (четкое выделение водных объектов). Далее по степени ухудшения точности выделения термокарстовых озер на космическом снимке следуют  $AWEI_{nsh}$  и TCW. Наихудший результат показал индекс MNDWI, который требует дополнительных усилий от эксперта для точного определения границ озера.

При сравнении результатов, представленных в табл. 2, получаем, что минимальное значение средней квадратической ошибки равно 0,11 км<sup>2</sup> и соответствует индексу NDWI. Практически идентичный результат (0,12 км<sup>2</sup>) у индекса WRI, чуть хуже (0,15 км<sup>2</sup>) у индекса NDVI. Самую высокую среднюю квадратическую ошибку имеет индекс MNDWI (7,02 км<sup>2</sup>).

Для большинства озер, особенно с четкой береговой линией, различия в контурах озер, полу-

Рис. 3. Сравнение результатов применения разных спектральных показателей: 1 – оз. Сымытыр, 2 – оз. Бакыл  
Fig. 3. Comparison of the results of using different spectral indices: 1 - Symytyr, 2 - Bakyl

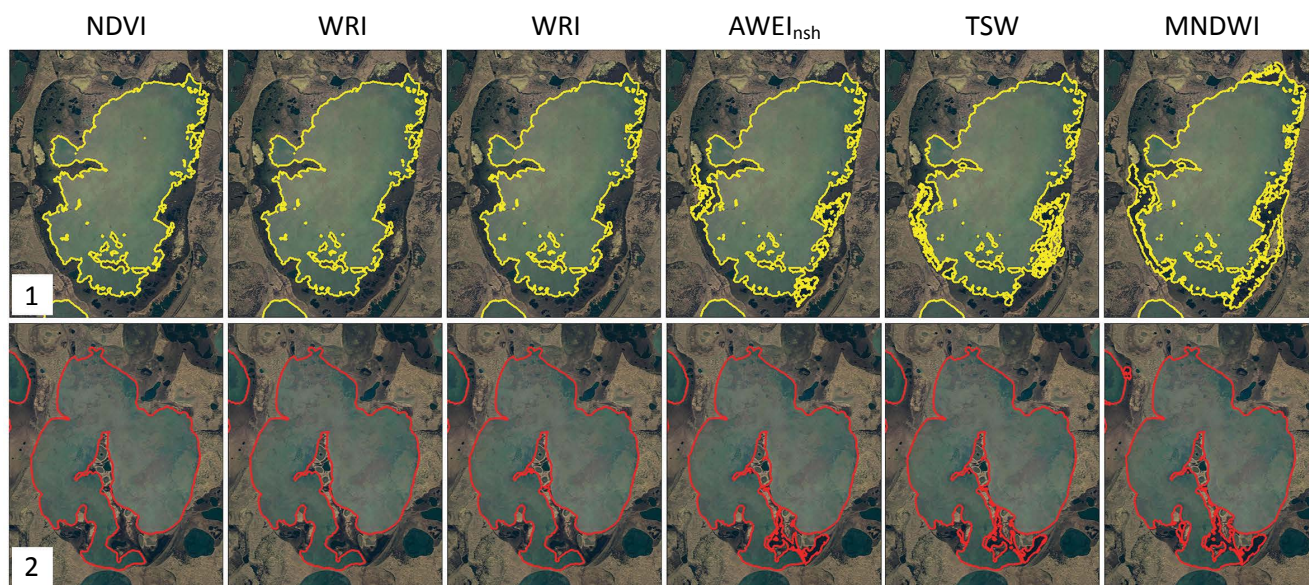


Табл. 2. Площадь термокарстовых озер  
 Tab. 2. Area of thermokarst lakes

	Озеро	Площадь, км <sup>2</sup>						
		AWEI <sub>nsh</sub>	MNDWI	NDVI	NDWI	TCW	WRI	Эталон
1	Омук-Кюель (Бакыл)	114,91	115,43	114,32	114,60	114,82	114,72	114,35
2	Хаптагай (Сагарычые)	97,08	97,28	96,71	96,89	97,05	96,96	97,00
3	Кюлюмер	85,61	85,83	85,23	85,49	85,37	85,55	85,88
4	Сангырыачча (Уолар-Кюель)	58,62	59,33	57,59	57,96	58,69	58,30	58,69
5	Сымытыр	54,44	60,97	49,72	50,32	55,78	50,67	50,21
6	Бакыл	53,16	53,82	50,94	51,19	53,06	51,29	50,97
7	Будунай (Мутное)	51,78	52,67	51,36	51,55	51,59	51,63	50,95
8	Кырбыт, вместе с оз. Бас-Кюель	48,91	49,96	47,82	48,07	48,75	48,18	47,36
9	Усун-Кюель	32,69	32,81	32,33	32,44	32,56	32,48	31,99
10	Алексейчан	25,45	25,82	25,10	25,27	25,30	25,32	25,38
11	Улахан-Джара-Кюель	22,50	22,60	22,25	22,37	22,43	22,40	22,43
12	Кенде-Кюель (Уолбут)	21,82	22,61	21,29	21,39	22,01	21,46	21,50
13	Урасалах	18,18	18,68	17,81	17,96	18,14	18,02	18,04
14	Эриек	15,53	15,58	15,40	15,46	15,51	15,50	15,47
15	Эдиганова (Кыра-Уолар-Кюель)	14,44	14,87	14,30	14,39	14,38	14,40	14,48
16	Уэся-Кыллах	12,52	12,56	12,44	12,50	12,45	12,51	12,55
17	Островное	12,42	13,21	11,61	11,83	12,46	11,91	12,11
18	Проточное (Муксуновка)	11,97	12,09	11,73	11,79	12,06	11,85	11,59
19	Турпаннах	10,46	10,51	10,30	10,39	10,39	10,41	10,28
20	Мутнинское (Протаинное)	10,17	10,20	10,08	10,13	10,11	10,14	10,19
21	Оголох	10,60	12,36	9,99	10,09	12,05	10,15	9,55
	Все озера	783,26	799,19	768,32	772,08	784,96	773,85	770,98
	Средняя квадратическая ошибка (m)	1,34	7,02	0,15	0,11	2,16	0,12	0

ченных при использовании разных спектральных показателей, незначительны или практически отсутствуют. Большие значения средней квадратической ошибки, характерные для индексов AWEI<sub>nsh</sub>, TCW и MNDWI связаны, скорее всего, с сильно увлажненной почвой прибрежной территории вокруг водоемов (озера Сымытыр, Бакыл, Оголох), которую алгоритм указанных индексов воспринял как водную поверхность. И если при дешифрировании небольшого числа водных объектов такие ошибки можно исправить в ручном режиме, то при значительном количестве озер (сотни и тысячи) выбор

этих индексов для автоматического выделения водоемов остается на усмотрение исследователя. Возможно в этом случае надо использовать модификации уже известных индексов, например, как предлагают в работе [17].

Полученные в данном исследовании результаты частично совпадают с выводами, приведенными в [9], но в указанной работе исследование проводилось на территории Восточного Непала. В большинстве исследований используются индексы NDVI, NDWI, MNDWI, WRI и лучшие результаты показывает MNDWI. В качестве примера можно

привести работы [3, 1, 4, 5, 8]. Все это показывает, что для более качественного дешифрирования необходимы дальнейшие исследования применения водных индексов, связанные с определением пороговых значений индексов.

Кроме того, в приведенных выше работах спектральные показатели использовались для разных природных зон: степи [3, 5, 8], тундра [4], полупустыни [12], смешанные леса [1], области высотной поясности Восточного Непала [10], саванны и редколесья [16, 15], антарктические пустыни [17]. Возможно, необходимо какое-либо исследование, рассматривающее особенности и различия применения спектральных показателей в разных природных зонах и климатических условиях.

### Выводы

Основная цель данного исследования состояла в том, чтобы провести сравнительный анализ

различных спектральных показателей для автоматического дешифрирования термокарстовых озер для арктической зоны России. Результаты обработки данных показали, что наилучший результат (минимальная СКО) из шести показателей соответствует индексу NDWI и равен 0,11 км<sup>2</sup>. Далее идет индекс WRI (СКО 0,12 км<sup>2</sup>) и NDVI (0,15 км<sup>2</sup>). Самую высокую среднюю квадратическую ошибку имеет индекс MNDWI (7,02 км<sup>2</sup>).

В целом для водоемов с четко различимой береговой линией подходят все используемые в исследовании индексы. Различия начинаются при выделении озер с сильно заросшими берегами или при наличии переувлажненной почвы вокруг водного объекта. В данном случае решение использовать тот или иной спектральный показатель остается на усмотрении исследователя в зависимости от его умений и поставленных целей.

### Литература

1. Катаев М.Ю., Бекеров А. А. Методика обнаружения водных объектов по многоспектральным спутниковым измерениям // Доклады ТУСУР. – 2017. – Т. 20. – № 4. – С. 105–108.
2. Кравцова В.И., Быстрова А.Г. Изменение размеров термокарстовых озер в различных районах России за последние 30 лет // Криосфера Земли. – 2009. – Т. 13. – № 2. – С. 16–26.
3. Курганович К.А., Носкова Е.В. Использование водных индексов для оценки изменения площадей водного зеркала степных содовых озер юго-востока Забайкалья по данным дистанционного зондирования // Вестник Забайкальского государственного университета. – 2015. – № 6 (121). – С. 16–24.
4. Корниенко С.Г. Анализ погрешностей при оценке изменений площади водоемов по данным космической съемки (на примере термокарстовых озер полуострова Ямал) // Водные ресурсы. – 2016. – Т. 43. – № 6. – С. 595–607. DOI: 10.7868/S0321059616060031.
5. Манилюк Т.А., Маслова А.В. Исследование водных поверхностей озер путем использования водных индексов по данным дистанционного зондирования // Вестник Забайкальского государственного университета. – 2017. – Т. 23. – № 3. – С. 4–11. DOI: 10.21209/2227-9245-2017-23-3-4-11.
6. Мерзлотно-ландшафтная карта Республики Саха (Якутия). Масштаб 1:1 500 000 / А.Н. Федоров, Я.И. Торговкин, А.А. Шестакова, Н.Ф. Васильев, В.С. Макаров и др.; гл. ред. М.Н. Железняк. – Якутск : ИМЗ СО РАН, 2018. – 2 л. – Фонды ИМЗ.
7. Национальный атлас России. – В 4-х томах. – Т. 2. Природа. Экология / А.Д. Думнов, А.А. Кирсанов, Е.А. Киселева и др. – М. ПКО Картография, 2007. – 496 с.
8. Погорелов А.В., Липилин Д.А., Курносова А.С. Спутниковый мониторинг Краснодарского водохранилища // Географический вестник. – 2017. – № 1 (40). – С. 130–137. DOI: 10.17072/2079-7877-2017-1-130-137.
9. Acharya T.D., Subedi A., Lee D.H. Evaluation of Water Indices for Surface Water Extraction in a Landsat 8 Scene of Nepal // Sensors. – 2018. – Vol. 18. – P. 2580. DOI: 10.3390/s18082580.
10. Acharya T.D., Subedi A., Yang I.T., Lee D.H. Combining Water Indices for Water and Background Threshold in Landsat Image // Proceedings. – 2018. – Vol. 2. – P. 143. DOI: 10.3390/ecs4-4-04902.
11. Baig M.H.A., Zhang L., Shuai T., Tong Q. Derivation of a tasseled cap transformation based on Landsat 8 at-satellite reflectance // Remote Sensing Letters. – 2014. – Vol. 5. – P. 423–431. DOI: 10.1080/2150704X.2014.915434.
12. Mustafa M.T., Hassoon Kh.I., Hussain H.M., Abd M.H. Using water indices (NDWI, MNDWI, NDMI, WRI and AWEI) to detect physical and chemical parameters by apply remote sensing and gis techniques // International Journal of Research – Granthaalayah. – 2017. – Vol. 5 (10). –pp. 117–128. DOI: 10.29121/granthaalayah.v5.i10.2017.2289.
13. Duguay C.R., Prowse T.D., Bonsal B.R., Brown R.D., Lacroix M.P., Ménard P. Recent trends in Canadian lake ice covers // Hydrological Processes. – 2006. – Vol. 20. – P. 781–801. DOI: 10.1002/hyp.6131.
14. Feyisa G.L., Meilby H., Fensholt R., Proud S.R. Automated Water Extraction Index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery // Remote Sensing of Environment. – 2014. – № 140. – pp. 23–35. DOI: 10.1016/j.rse.2013.08.029.
15. Gautam V.K., Gaurav P.K., Murugan P., Annadurai M. Assessment of Surface Water Dynamics in Bangalore Using WRI, NDWI, MNDWI, Supervised Classification and K-T Transformation // Aquatic Procedia. – 2015. – Vol. 4. – pp. 739–746. DOI: 10.1016/j.aqpro.2015.02.095.
16. Herndon K., Muench R., Cherrington E., Griffin R. An Assessment of Surface Water Detection Methods for Water Resource Management

- in the Nigerien Sahel // *Sensors*. – 2020. – Vol. 20 (2). – P. 431. DOI: 10.3390/s20020431.
17. *Jawak S.D., Luis A.J.* A rapid extraction of water body features from Antarctic coastal oasis using very high-resolution satellite remote sensing data // *Aquatic Procedia*. – 2015. – Vol. 4. – pp. 125–132. DOI: 10.1016/j.aqpro.2015.02.018.
18. *Kriegler F.J., Malila W.A., Nalepka R.F., Richardson W.* Preprocessing Transformations and Their Effects on Multispectral Recognition // *Proceedings of the Sixth International Symposium on Remote Sensing of Environment*. – Ann Arbor : Environmental Research Institute of Michigan, 1969. – Vol. 2. – pp. 97–131.
19. *McFeeters S.K.* The use of Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features // *International Journal of Remote Sensing*. – 1996. – Vol. 17. – Iss. 7. – pp. 1425–1432. DOI: 10.1080/01431169608948714.
20. *Miller G., Briner J., DeVogel S.* The rapidly disappearing plateau ice caps of central Baffin Island: Where will it all end? // *34th International Arctic Workshop, Programs and Abstracts*, 11–13 March 2004. – Boulder : Institute of Arctic and Alpine Research, 2004. – P. 120.
21. *Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A., Deering D.W.* Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS // *Proceedings of the 3rd Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium*. – Washington: NASA, 1973. – Vol. 1. – pp. 309–317.
22. *Shen L., Li C.* Water Body Extraction from Landsat ETM+ Imagery using Adaboost algorithm // *Proceedings of 18th International Conference on Geoinformatics*. – Beijing : Institute of Electrical and Electronic Engineers, 2010. – pp. 1–4. DOI: 10.1109/GEOINFORMATICS.2010.5567762.
23. *Swanson D.K.* Thermokarst and precipitation drive changes in the area of lakes and ponds in the National Parks of northwestern Alaska, 1984–2018 // *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*. – 2019. – Vol. 51. – Iss. 1. – pp. 265–279. DOI: 10.1080/15230430.2019.1629222.
24. *Xu H.* Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery // *International Journal of Remote Sensing*. – 2006. – Vol. 27. – Iss. 4. – pp. 3025–3033.

## References

1. *Kataev M.Yu., Bekеров A.A.* Methodology of the water objects detection from multi-spectrum satellite measurements. *Proceedings of TUSUR University*. 2017;20(4):105–108 [in Russian].
2. *Kravtsova V.I., Bystrova A.G.* Changes in thermokarst lake size in different regions of Russia for the last 30 years. *Earth's Cryosphere*. 2009;13(2):16–26 [in Russian].
3. *Kurganovich K.A., Noskova E.V.* The estimation of water surface variations of steppe soda lakes in the southeast of Transbaikalie with using of remote sensing of water indices. *Transbaikal State University Journal*. 2015;6(121):16–21 [in Russian].
4. *Kornienko S.G.* Analysis of errors in estimating changes in water body areas by satellite data: case study of thermokarst lakes in Yamal peninsula. *Water Resources*. 2017;44(2):180–191. DOI: 10.1134/S0097807816060038.
5. *Manilyuk T.A., Maslova A.V.* The research of water surfaces of lakes by applying of water index based on the remote sensing data. *Transbaikal State University Journal*. 2017;23(3):4–11. DOI: 10.21209/2227-9245-2017-23-3-4-11 [in Russian].
6. *Fedorov A.N., Torgovkin Ja.I., Shestakova A.A., Vasil'ev N.F., Makarov V.S. et al.; Zheleznyak M.N.* (chief ed.). Merzlotno-landshaftnaya karta Respubliki Sakha (Yakutiya). Masshtab 1:1 500 000. [Cryogenic and landscape map of Sakha Yakutia Republic. Scale 1:1 500 000]. Yakutsk: Melnikov Permafrost Institute SB RAS; 2018. 2 sheets. [in Russian].
7. *Dumnov A.D., Kirсанov A.A., Kiseleva E.A. et al.* Natsional'nyi atlas Rossii. T. 2. Priroda. Ekologiya [National atlas of Russia. V. 2. Nature. Ecology]. Moscow: PKO Kartografiya; 2007. 496 p. [in Russian].
8. *Pogorelov A.V., Lipilin D.A., Kurnosova A.S.* Sputnikovyi monitoring Krasnodarskogo vodokhranilishcha [Satellite monitoring of the Krasnodar reservoir]. *Geographical Bulletin*. 2017;1(40):130–137. DOI: 10.17072/2079-7877-2017-1-130-137 [in Russian].
9. *Acharya T.D., Subedi A., Lee D.H.* Evaluation of Water Indices for Surface Water Extraction in a Landsat 8 Scene of Nepal. *Sensors*. 2018;18:2580. DOI: 10.3390/s18082580.
10. *Acharya T.D., Subedi A., Yang I.T., Lee D.H.* Combining Water Indices for Water and Background Threshold in Landsat Image. *Proceedings*. 2018;2:143. DOI: 10.3390/ecsa-4-04902.
11. *Baig M.H.A., Zhang L., Shuai T., Tong Q.* Derivation of a tasseled cap transformation based on Landsat 8 at-satellite reflectance. *Remote Sensing Letters*. 2014;5:423–431. DOI: 10.1080/2150704X.2014.915434.
12. *Mustafa M.T., Hassoon Kh.I., Hussain H.M., Abd M.H.* Using water indices (NDWI, MNDWI, NDMI, WRI and AWEI) to detect physical and chemical parameters by apply remote sensing and gis techniques. *International Journal of Research – Granthaalayah*. 2017;5(10):117–128. DOI: 10.29121/granthaalayah.v5.i10.2017.2289.
13. *Duguay C.R., Prowse T.D., Bonsal B.R., Brown R.D., Lacroix M.P., Ménard P.* Recent trends in Canadian lake ice covers. *Hydrological Processes*. 2006;20:781–801. DOI: 10.1002/hyp.6131.
14. *Feyisa G.L., Meilby H., Fensholt R., Proud S.R.* Automated Water Extraction Index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*. 2014;140:23–35. DOI: 10.1016/j.rse.2013.08.029.
15. *Gautam V.K., Gaurav P.K., Murugan P., Annadurai M.* Assessment of Surface Water Dynamics in Bangalore Using WRI, NDWI, MNDWI, Supervised Classification and K-T Transformation. *Aquatic Procedia*. 2015;4:739–746. DOI: 10.1016/j.aqpro.2015.02.095.
16. *Herndon K., Muench R., Cherrington E., Griffin R.* An Assessment of Surface Water Detection Methods for Water Resource Management in the Nigerien Sahel. *Sensors*. 2020;20(2):431. DOI: 10.3390/s20020431.
17. *Jawak S.D., Luis A.J.* A rapid extraction of water body features from Antarctic coastal oasis using very high-resolution satellite remote sensing data. *Aquatic Procedia*. 2015;4:125–132. DOI: 10.1016/j.aqpro.2015.02.018.

18. Kriegler F.J., Malila W.A., Nalepka R.F., Richardson W. Preprocessing Transformations and Their Effects on Multispectral Recognition. In: Proceedings of the Sixth International Symposium on Remote Sensing of Environment. Ann Arbor: Environmental Research Institute of Michigan; 1969. V. 2. Pp. 97–131.
19. McFeeters S.K. The use of Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*. 1996;17(7):1425–1432. DOI: 10.1080/01431169608948714.
20. Miller G., Briner J., DeVogel S. The rapidly disappearing plateau ice caps of central Baffin Island: Where will it all end? In: International Arctic Workshop, Programs and Abstracts, 11–13 March 2004. Boulder: Institute of Arctic and Alpine Research; 2004. P. 120.
21. Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A., Deering D.W. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: Proceedings of the 3rd Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium. Washington: NASA; 1973. V. 1. Pp. 309–317.
22. Li Shen, Changchun Li. Water Body Extraction from Landsat ETM+ Imagery using Adaboost algorithm. In: Proceedings of 18th International Conference on Geoinformatics. Beijing: Institute of Electrical and Electronic Engineers, 2010. Pp. 1–4. DOI: 10.1109/GeoINFORMATICS.2010.5567762.
23. Swanson D.K. Thermokarst and precipitation drive changes in the area of lakes and ponds in the National Parks of northwestern Alaska, 1984–2018. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*. 2019;51(1):265–279. DOI: 10.1080/15230430.2019.1629222.
24. Xu H. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*. 2006;27(4):3025–3033.

### Информация об авторе

#### Пшеничников Артем Евгеньевич

Кандидат географических наук,  
Доцент кафедры картографии и геоинформационных систем  
Института наук о Земле  
Тюменский государственный университет  
625003, Россия, Тюмень, ул. Володарского, д. 6  
e-mail: a.e.pshenichnikov@utmn.ru

### Information about author

#### Artem E. Pshenichnikov

Candidate of Geography Sciences,  
Assistant Professor at the Cartography and Geoinformation Systems  
Department of the Institute of Earth Sciences  
Tyumen State University  
6, Volodarskogo str., Tyumen, 625003, Russia  
e-mail: a.e.pshenichnikov@utmn.ru