

Применение спектральных индексов для изучения экологических особенностей тундровых озёр

К. И. Симонова, Н. В. Цыркунова

*Ботанический институт имени В. Л. Комарова РАН
Санкт-Петербург, 197376, Россия
E-mail: KSimonova@binran.ru*

Озёрные экосистемы Арктики крайне динамичны и играют важную роль для растительного и животного мира северных территорий. В настоящее время они испытывают высокую антропогенную нагрузку, что вызывает необходимость мониторинга их состояния и растительности. Проведение масштабных полевых исследований на удалённых и труднодоступных территориях весьма проблематично, однако дистанционные методы позволяют получить актуальную информацию. Работа посвящена изучению экологических особенностей 16 тундровых озёр на западе Большеземельской тундры в бассейне р. Ортины на основе полевых работ, выполненных в 2023 г., и данных дистанционного зондирования Земли. Для каждого озера было проведено геоботаническое описание с регистрацией водородного показателя pH и минерализации, определены морфометрические показатели и происхождение озёр. Для изучения отклика водной поверхности на увеличение количества взвешенных частиц и цветение воды в течение вегетационного периода применялись рассчитанные индексы NDTI (*англ.* Normalized Difference Turbidity Index), NDWI (*англ.* Normalized Difference Water Index), MNDWI (*англ.* Modified Normalized Difference Water Index) и NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index). Также была выявлена корреляция между значениями NDVI и данными о проективном покрытии растительностью геоботанических площадок, в результате чего стало возможным оценить проективное покрытие исследуемых озёр дистанционными методами.

Ключевые слова: озеро, тундра, Арктика, растительность, дистанционное зондирование, NDTI, NDWI, MNDWI, NDVI

Одобрена к печати: 18.09.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-5-249-262

Введение

Обилие озёр — характерная особенность зоны тундр. Они являются важнейшим источником пресной воды, местообитанием для многих ресурсных видов рыб, а также местами нагула, гнездования и важнейшей кормовой базой водоплавающих птиц Арктики.

Водоёмы тундры разнообразны по происхождению, физическим, химическим и биологическим характеристикам. По происхождению тундровые озёра делятся на термокарстовые, озёра речного происхождения, лагунные, а также ледниковые — озёра, образовавшиеся в зоне стаивания мёртвого льда и в ледниковых понижениях рельефа (Голдина, 1972). Несмотря на разное происхождение, они характеризуются рядом общих черт, таких как высокая прозрачность, невысокая цветность, низкая минерализация воды, незначительное содержание соединений биогенных элементов (Флора..., 1978).

В районе исследований наиболее распространёнными являются термокарстовые озёра. Они приурочены к плоско- и крупнобугристым торфяникам и плоским водоразделам, сложенным песчаными и суглинистыми грунтами (Вехов, Кулиев, 1986). Эти озёра обычно характеризуются простыми округлыми очертаниями, небольшой глубиной, слабым стоком, часто имеют заболоченный водосбор. Большинство термокарстовых озёр имеют глубину до 1 м и площадь менее 1 км².

Пойменные озёра образуются в результате отшнуровывания от русла рукавов и притоков, характеризуются небольшими размерами. Обычно соединены протоками с рекой, их режим определяется режимом водотока.

В настоящее время на арктические экосистемы оказывается значительная антропогенная нагрузка, связанная с разработкой месторождений нефтяных углеводородов, их добычей

и транспортировкой. Для мониторинга изменений необходимо изучать водные экосистемы как в естественном виде, так и уже подвергшиеся воздействию человека. В данной работе были изучены водоёмы, не испытывавшие антропогенную нагрузку.

В качестве индикатора экологических условий озёр может рассматриваться водная и прибрежно-водная растительность. Однако в полевых условиях оценка обилия гидрофильной растительности в пределах всего водоёма представляется достаточно трудной задачей в связи с неравномерностью её распределения. Дистанционные методы способны значительно дополнить эти данные.

Анализ материалов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) позволяет получать более точную информацию о морфометрии озёр, также на основе их спектральных характеристик рассчитывается большое число индексов, отражающих особенности распределения растительности и экологические характеристики водоёмов (Бондаренко и др., 2021; Поддубный и др., 2022). Что особенно важно, учитывая труднодоступность таких объектов в условиях тундры, применение ДЗЗ позволяет организовать дистанционный мониторинг сезонных и многолетних изменений состояния озёрных экосистем (Liu et al., 2023; Urbanski, 2022). Первым этапом при организации мониторинга озёр становится изучение их экологических характеристик в полевых условиях, оценка их дифференциации и взаимосвязи со спектральными показателями спутниковых снимков. Это даёт возможность дистанционно выявить изменения, происходящие в озёрных экосистемах под влиянием климатических и антропогенных факторов.

В связи с этим целью настоящей работы стало выявление спектральных характеристик и экологических особенностей озёр в бассейне р. Ортины с использованием полевых данных и методов дистанционного зондирования.

Район и объекты исследования

Исследования проводились в западной части Большеземельской тундры, в бассейне р. Ортины. Ландшафты данной территории относятся к субарктическим южно-тундровым морским аккумулятивным равнинам с многочисленными термокарстовыми котловинами и озёрами, с ивняковыми травяно-кустарничковыми, кустарничково-моховыми мелкобугорковыми тундрами, с аллювиальными аккумулятивными ландшафтами вдоль пойм крупных рек (Гудилин, 1980). Их поверхность образована серией плоских песчаных или песчано-суглинистых отложений бореальной трансгрессии (верхние террасы) или послеледниковых трансгрессий с многочисленными остаточными и термокарстовыми озёрами; абсолютные высоты до 50–80 м, местами до 120 м и больше (Исаченко, 1985). Для исследования были выбраны 16 озёр разных форм и размеров, различных по происхождению, экологическим и спектральным характеристикам (рис. 1, см. с. 251). На момент проведения полевых работ они не были подвержены воздействию человека.

Материалы и методы

Полевые работы

Полевые работы проводились в июле 2023 г. и включали исследование основных характеристик озёр: морфометрических показателей, глубины у берега, формы, характера берега, происхождения, субстрата, водородного показателя рН и минерализации. Также было выполнено геоботаническое описание водной и прибрежно-водной растительности. Всего было описано 48 площадок (см. рис. 1), из них в настоящей работе использовано 13 как наиболее репрезентативных и различных по плотности проективного покрытия и видовому составу. Размер пробной площади зависел от площади, занимаемой сообществом, и составлял от 4 до 25 м² (рис. 2, см. с. 251). При описании каждому виду была дана комбинированная оценка обилия и покрытия.

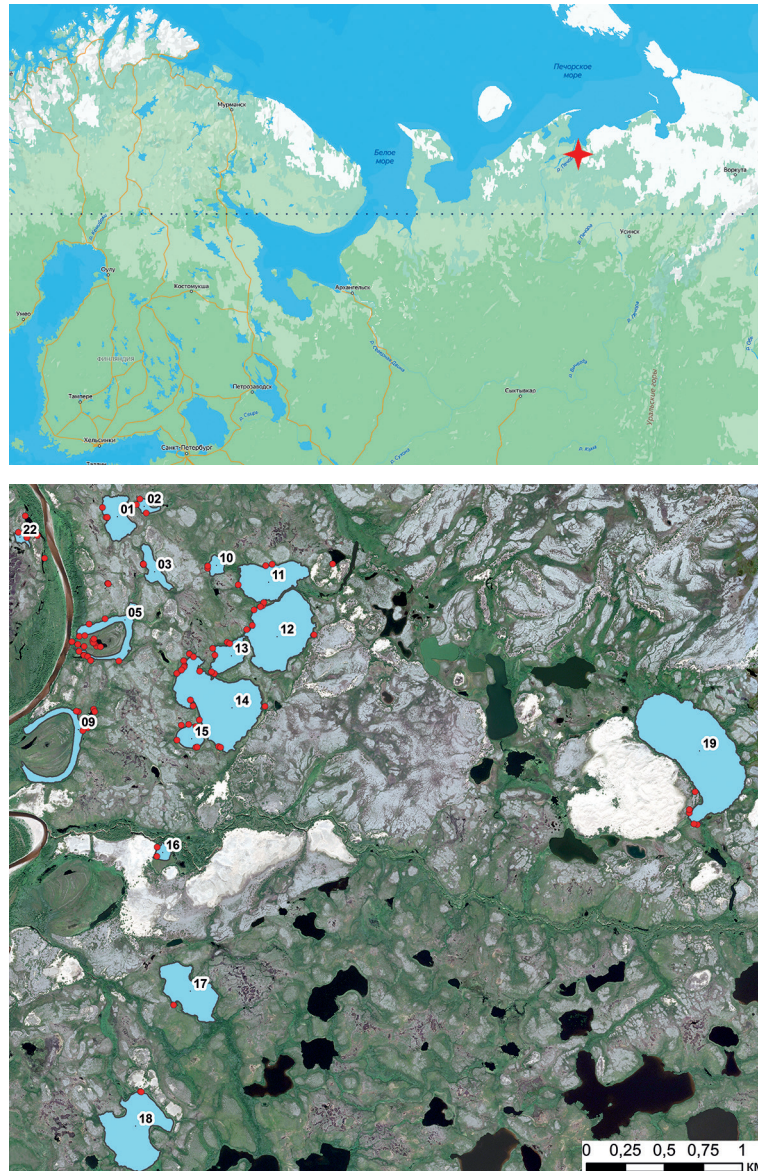


Рис. 1. Схема расположения исследованных озёр и геоботанических площадок. Красным цветом отмечены площадки выполнения геоботанических описаний



Рис. 2. Максимальные и минимальные размеры пробных площадок относительно размера пикселя Sentinel-2

Спутниковые данные

Границы исследуемых водоёмов были оцифрованы вручную по снимку сверхвысокого разрешения, находящемуся в открытом доступе (SAS Planet, <https://www.sasgis.org/sasplaneta/>). В результате были вычислены такие характеристики, как периметр и площадь водоёмов, а также изрезанность береговой линии.

Для получения спектральных характеристик исследуемых озёр были использованы 10 мультиспектральных спутниковых снимков Sentinel-2 за период с конца мая до середины октября 2023 г. Пространственное разрешение мультиспектрального сенсора спутника — 10–20 м на пиксель. Для каждого снимка были рассчитаны индексы NDTI (*англ.* Normalized Difference Turbidity Index), NDWI (*англ.* Normalized Difference Water Index), MNDWI (*англ.* Modified Normalized Difference Water Index) и NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index) по формулам, указанным ниже (*табл. 1*).

Таблица 1. Названия и формулы использованных в работе индексов

Индекс	Формула
NDTI, нормализованный разностный индекс мутности (Lacaux et al., 2006)	$NDTI = \frac{RED - GREEN}{RED + GREEN}$
NDWI, нормализованный разностный водный индекс (Gao, 1996)	$NDWI = \frac{NIR - SWIR2}{NIR + SWIR2}$
MNDWI, модифицированный нормализованный разностный водный индекс (Xu, 2006)	$MNDWI = \frac{GREEN - SWIR2}{GREEN + SWIR2}$
NDVI, нормализованный разностный индекс растительности (Rouse et al., 1974)	$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$

Примечание: RED — красный канал, GREEN — зелёный, NIR (*англ.* Near InfraRed) — ближний инфракрасный, SWIR (*англ.* Short Wave InfraRed) — ближний инфракрасный канал.

При изучении спектральных характеристик водной поверхности от береговой линии каждого озёра был создан внутренний буфер 15 м для исключения пикселей, захватывающих берег озера с наземной и прибрежной растительностью.

Полученная информация была проанализирована двумя путями: при помощи зональной статистики для каждого озера и при помощи анализа значений пикселей в точках проведения геоботанических описаний водной растительности с известными данными о субстрате и видовом составе растительности на площадках. Помимо этого для оценки общего проективного покрытия растительности всех водоёмов было определено количество пикселей в установленных интервалах значений индекса NDVI.

Сезонная характеристика спектральных показателей озёр. Для исследуемых водоёмов по каждому индексу были рассчитаны основные статистические показатели: количество пикселей, площадь, минимальное, максимальное и среднее значения, диапазон значений, стандартное отклонение и сумма.

Полученные результаты проанализированы как по дате снимка (сравнительный анализ озёр), так и по сезонной динамике спектральных показателей каждого водоёма в течение вегетационного сезона.

Сезонная спектральная характеристика геоботанических площадок. Каждая геоботаническая площадка характеризовалась различными типами растительности и проективным покрытием: с преобладающими частично погружёнными, плавающими и полностью погружёнными растениями, с плотным и разреженным проективным покрытием. Места расположения площадок были откорректированы по реперным точкам. Сравнение полевых данных со спутниковой информацией проводилось на основе снимка от 1 августа (до начала цветения воды). Стоит отметить, что размер пробных площадок значительно меньше пикселя (см. *рис. 2*).

Кроме площадок с описаниями, для проведения сравнительного анализа были опробованы три площадки на р. Ортине с различными глубинами и светлым песчаным субстратом, на которых полностью отсутствовала растительность.

Результаты

Все обследованные озёра по происхождению были отнесены к озёрам термокарстового и речного прохождения.

Термокарстовые озёра были приурочены к плоскобугристым торфяникам на понижениях плоских водоразделов, сложенных песчаными грунтами. Они характеризовались небольшой глубиной, форма и размеры были разнообразны (от 5 до 300 тыс. м²), показатель изрезанности береговой линии варьировал от 0,009 до 0,068.

Воды термокарстовых озёр на минеральных и торфяных грунтах, приуроченные к плоским водоразделам, были нейтральными и слабокислыми (значения рН 5,51–7,41) и имели низкую минерализацию (от 11 до 70 мг/л). Донные отложения — песчаные, песчано-илистые и илистые (табл. 2).

Таблица 2. Морфометрические и экологические характеристики озёр

№ озера	Площадь, тыс. м ²	Показатель изрезанности	Происхождение	Субстрат	рН	Минерализация, мг/л	Число видов мхов	Число видов макрофитов	Число синтаксонов
1	43,6	0,023	ТК	пи	6,57	31	0	3	3
2	8,0	0,053			6,98	70	1	6	2
3	23,3	0,038			6,79	34	0	3	
5	41,7	0,052	П		7,12	46	3	5	1
9	48,4	0,050			6,58	43	0		2
10	10,6	0,040	ТК		6,19	32	1	6	3
11	82,2	0,018			6,66	42	0	5	1
12	157,2	0,011			6,50	40			2
13	33,8	0,025			ил.	6,58	38	1	4
14	190,9	0,012	пи	6,26	44	10	6		
15	20,1	0,026		6,94	59	8	3		
16	8,7	0,045	П	пес.	6,60	12		2	1
17	85,2	0,018	ТК	торф.	6,47	40		4	2
18	139,4	0,014			пес.	7,41	46		
19	308,5	0,009				7,14	35	3	6
22	5,3	0,068		пи	5,51	11	2	2	3

Примечание: ТК — термокарстовое; П — пойменное; пи — песчано-илистый; торф. — торфяной; пес. — песчаный; ил. — илистый.

Пойменные озёра включали в себя старицы, образовавшиеся в результате отшнурования от русла р. Ортины, и вторично-пойменные озёра, прилегающие к поймам р. Ортины и ручья Быкшор. Старицы имели характерную удлинённую форму длиной до 1 км, площадью до 48 тыс. м² и показателем изрезанности береговой линии около 0,05, вторично-пойменное озеро имело округлую форму.

Воды пойменных озёр были нейтральными (рН 6,58–7,12) и имели низкую минерализацию (12–46 мг/л). Субстрат встречался песчаный, песчано-илистый или илистый.

Флористический состав термокарстовых водоёмов насчитывал 22 вида сосудистых растений и мхов. Наиболее бедный видовой и синтаксономический состав был характерен для

термокарстовых озёр на торфяниках, где доминировали осока водная (*Carex aquatilis*), водяная сосенка (*Hippuris vulgaris*), а также амфибийный вид — ежеголовник северный (*Sparganium hyperboreum*). Для термокарстовых озёр на минеральных субстратах было характерно большее видовое и синтаксономическое разнообразие. В озёрах с песчаными грунтами преобладали осока водная, осока носатая (*Carex rostrata*), хвощ приречный (*Equisetum fluviatile*) и ежеголовник северный. В озёрах с илистыми и песчано-илистыми грунтами наблюдалось увеличение видового разнообразия — появлялись гидатофиты, среди которых наиболее распространён рдест пронзённолистный (*Potamogeton perfoliatus*).

Флора пойменных озёр была представлена девятью видами с доминированием осок водяной и носатой, а также были широко распространены сплавины сабельника болотного (*Comarum palustre*) и вахты трёхлистный (*Menyanthes trifoliata*), встречался ежеголовник северный.

Спектральные индексы водных зеркал

NDTI. Индекс рассчитывается по данным зелёного и красного диапазона спектра и варьирует от -1 до 1 . Он помогает выявить изменения концентрации взвешенных частиц и планктона в воде.

При изучении сезонной динамики на большинстве озёр можно выделить два периода возрастания значений NDTI: в конце мая — начале июня, при интенсивном таянии снегового покрова, а также в начале августа, в момент интенсивного цветения воды.

Высокие значения NDTI (до 1) наблюдались 4 июня для воды озёр, окружённых наиболее крутыми склонами, способствовавшими сносу взвешенного материала вместе с талыми водами. У озёр, расположенных на относительно выровненной поверхности, изменения в индексе едва прослеживались, максимальные значения оставались в пределах $0,3$.

Второй раз увеличение амплитуды и средних значений индекса зарегистрировано на снимке от 11 августа, в момент цветения воды. Изменения в значениях NDTI были разными: к примеру, в озёрах № 10 и 17 среднее значение мутности увеличилось на $0,8$ и $0,1$ соответственно, по сравнению с более ранним по дате снимком (рис. 3). В целом, для большинства озёр среднее значение NDTI увеличилось незначительно или оставалось на том же уровне.

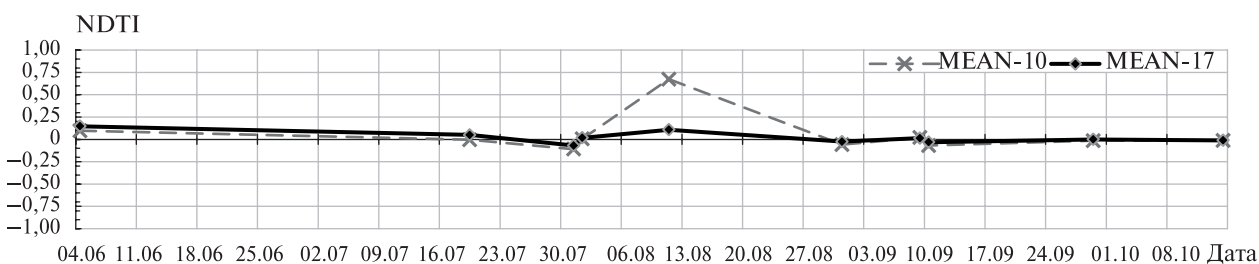


Рис. 3. График сезонной динамики индекса NDTI на озёрах № 10 и 17. MEAN-10 и MEAN-17 — средние значения NDTI для 10-го и 17-го озёр соответственно

NDWI и MNDWI. Индексы позволяют выявить площадь открытой воды на спутниковых снимках. Значения индексов в обоих случаях колеблются от -1 до 1 . При использовании NDWI диапазоны значений на пространствах с растительностью ($-0,1...-0,4$) и с открытой водой ($>0,2$) могут перекрываться, что можно наблюдать при расчёте индекса для озёр района исследований. Индекс MNDWI позволил более отчётливо выявить долю открытой воды и отделить её от других типов поверхностей.

Водным объектам соответствуют значения $NDWI > 0,2$ и $MNDWI > 0$. Средние значения NDWI, полученные для акваторий исследуемых озёр, в большинстве случаев превышали $0,2$. На снимке от 19 июля значения индекса варьировали в диапазоне $0,15-0,38$. На снимке от 11 августа на некоторых озёрах было выявлено цветение воды различной интенсивности,

что привело к изменению отражательных свойств поверхности. Сравнительный анализ значений NDWI от 1 и 11 августа показал, что неизменными остались только показатели индекса для озёр № 14, 15 и 22, для остальных значения снизились на 0,1–0,34 (рис. 4). Таким образом, изменения средних значений индекса NDWI на величину, превышающую 0,2 для всей площади водоёмов, был отмечен для озёр № 5, 9, 11, 16, более 0,3 — для озёр № 3, 10.

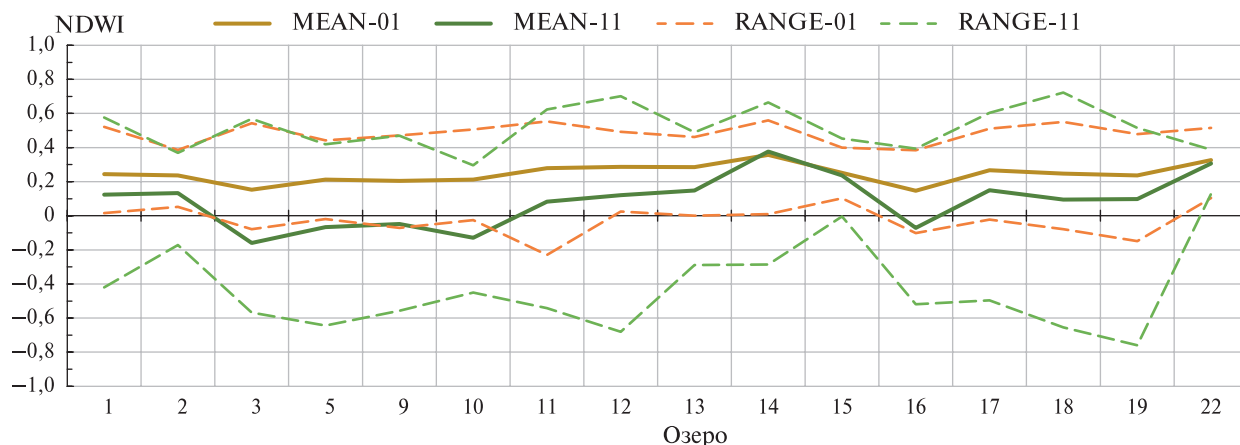


Рис. 4. График сезонной динамики индекса NDWI за 1 и 11 августа. Пунктирные линии RANGE-01 и RANGE-11 — границы индекса для 1 и 11 августа, утолщённые линии MEAN-01 и MEAN-11 — средние значения NDWI для 1 и 11 августа

Особенности сезонной динамики значений индекса MNDWI значительно различались. У озёр № 11, 12, 14, 18 и 19 среднее значение индекса оставалось положительным на протяжении всего вегетационного периода. На остальных озёрах данный индекс отреагировал на интенсивное развитие фитопланктона 11 августа: средние значения MNDWI снизились на 0,15–0,68. В озёрах № 1 и 9 значения индекса уменьшились более чем на 0,2; ещё более значительно — в озёрах № 5 и 10 (более 0,4) (рис. 5).

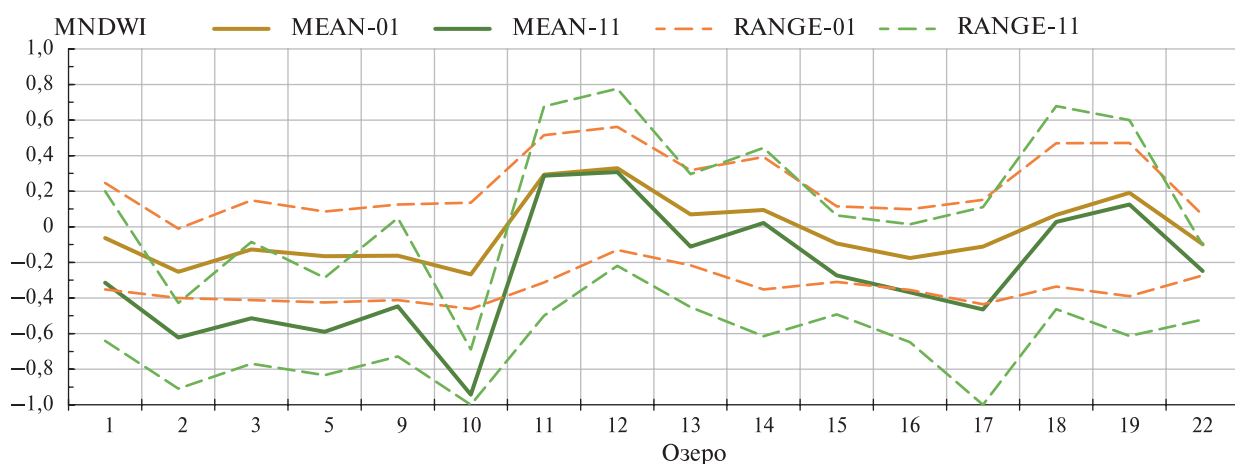


Рис. 5. График сезонной динамики индекса MNDWI за 1 и 11 августа. Пунктирные линии RANGE-01 и RANGE-11 — границы индекса для 1 и 11 августа, утолщённые линии MEAN-01 и MEAN-11 — средние значения MNDWI для 1 и 11 августа

Таким образом, в период цветения воды (11 августа) не было отмечено существенного (>0,2) изменения значений ни одного из использованных индексов в озёрах № 2, 12, 13, 14, 15, 18, 19, 22, что свидетельствует о слабой интенсивности или отсутствии процесса цветения в этих водоёмах. На изменения отражательных свойств озера № 10, напротив, заметно

отреагировали все три индекса, для озера № 3 — NDWI и MNDWI; сильное изменение значений в озере № 5 было обнаружено только для MNDWI, в озере № 17 — только для NDTI.

NDVI. Индекс служит индикатором количества зелёной фитомассы. Выявляя различия между красным и инфракрасным каналами, он позволяет вычислить часть излучения спектра, поглощённую растительным покровом. Значения индекса колеблются от -1 до 1 , отрицательные значения характерны для акваторий с отсутствующей или сильно разреженной растительностью.

Вследствие наличия сомкнутой или достаточно густой растительности на некоторых исследованных озёрах их значения NDVI не всегда оставались отрицательными. Например, в летнее время средние значения индекса озёр № 1, 2, 3, 5, 9, 10 и 16 всегда превышали нулевые значения. Наиболее высокие средние значения ($>0,2$ по сравнению с более ранними снимками) были отмечены 11 августа для озера № 10.

Средние значения NDVI имели отрицательную корреляцию с площадью водоёмов (коэффициент корреляции КК равен $-0,52$) и положительную связь с коэффициентом изрезанности водоёмов (КК = $0,69$).

Спектральные показатели площадок геоботанических описаний

В полевых условиях были описаны площадки с различным проективным покрытием (ПП) и доминирующими видами, что позволило оценить сезонную динамику NDVI на площадках с известным проективным покрытием (табл. 3).

Таблица 3. Эталонные площадки с различными типами растительности

Растительность	№ площадки	Площадь, м ²	Доминирующий вид	ПП, %	NDVI
Сомкнутая частично погружённая, DA	84	15	<i>Hippuris vulgaris</i>	60	0,577
	128	25		30	0,487
Единичная частично погружённая, SA	132	6	<i>Equisetum fluviatile</i>	15	0,415
	133	9	<i>Hippuris vulgaris</i>	20	0,238
Сомкнутая плавающая, DF	68	25	<i>Sparganium hyperboreum</i>	100	0,643
	76	4		100	0,680
	82	4		70	0,701
Единичная плавающая, SF	55	10	<i>Sparganium hyperboreum</i>	50	0,488
	141	9		20	0,270
	146	9		30	0,474
Сомкнутая подводная, DU	127	9	<i>Potamogeton perfoliatus</i>	50	0,501
Единичная подводная, SU	138	9	<i>Potamogeton perfoliatus</i>	25	0,245
	142	9		30	0,517

Площадки с частично погружённой растительностью. В качестве представителей частично погружённой растительности отмечены сообщества водяной сосенки. На площадках № 84 и 128 с высоким ПП этого вида, равным 30–60 %, значения NDVI на снимке от 11 августа достигали своего максимума, 0,68 и 0,62 соответственно (рис. 6, см. с. 257). При этом на 128-й площадке субстрат светлый, на 84-й — тёмный с мутной водой и тиной, что отражается на значениях индекса в начале июня и сентября–октября: на площадке с тёмным субстратом значение не опускается ниже 0,3, тогда как на светлом субстрате и весной, и осенью оно ниже нуля.

На площадке № 133 с редкими особями макрофитов (ПП = 20 %) и тёмным субстратом значения индекса расходятся со значениями открытой воды без растительности только к концу июля и достигают 0,33 к 11 августа (см. рис. 5). Осенью 10 сентября наблюдается повторное повышение значений NDVI до 0,55.

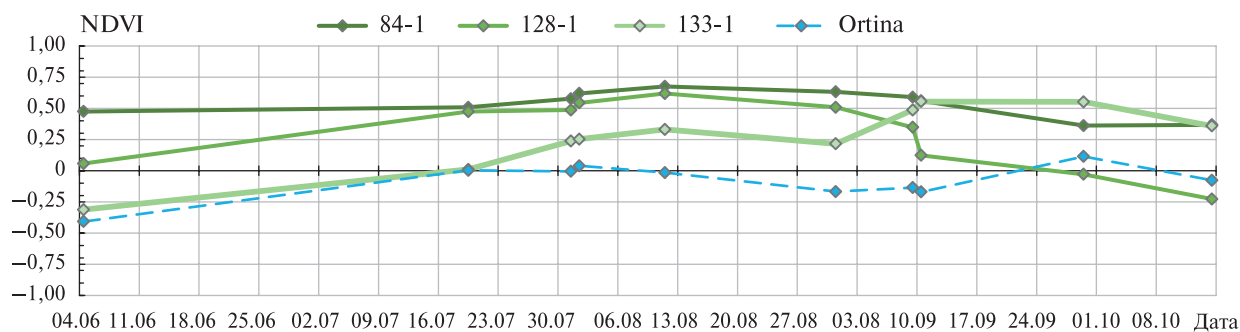


Рис. 6. График сезонной динамики индекса NDVI на площадках № 84, 128 и 133 с частично погружённой водной растительностью (ПП = 60, 30 и 20 % соответственно). Голубая прерывистая линия здесь и далее соответствует значениям индекса на р. Ортине

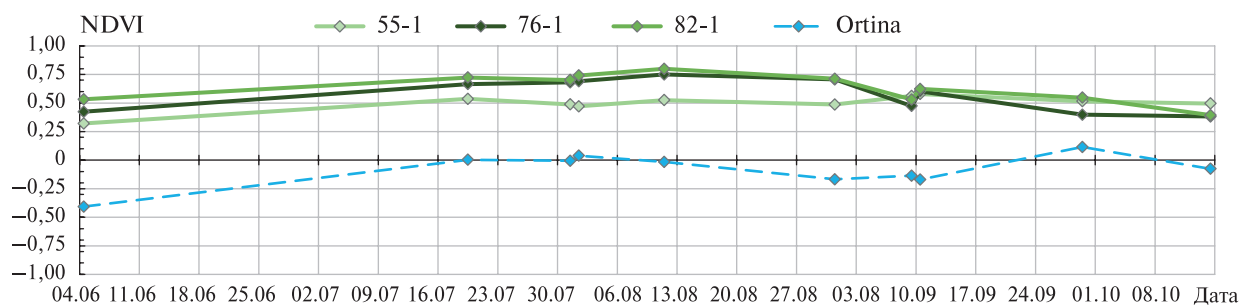


Рис. 7. График сезонной динамики индекса NDVI на площадках № 55, 76 и 82 с плавающей растительностью (ПП = 50, 100 и 70 % соответственно)

Площадки с плавающей растительностью. На площадках № 76 и 82 с обильными плавающими на поверхности листьями ежеголовника (ПП = 70–100 %) наблюдалась схожая динамика показателей индекса NDVI: от 0,42–0,53 в начале июня до максимальных (0,7–0,8) 11 августа с последующим плавным спадом (рис. 7).

На площадке № 55 с мутной водой и более низкой плотностью растений (ПП = 50 %) индекс вырос от 0,32 в июне до 0,53 в августе и 0,58 в сентябре (см. рис. 7).

Площадки с подводной растительностью. Среди исследованных озёр отсутствовали водоёмы с сомкнутой, но исключительно подводной растительностью. Были проанализированы данные площадок № 127 и 138 с разреженными зарослями рдеста пронзённостного (ПП = 25 %), где наблюдались единичные особи плавающего ежеголовника северного. На протяжении июня и начала июля значения индекса NDVI находились чуть выше значений открытой воды, затем различия стали более выражены и 11 августа NDVI достигли максимальных значений: 0,55 (рис. 8). На площадке № 127 наблюдался второй пик значений в сентябре.

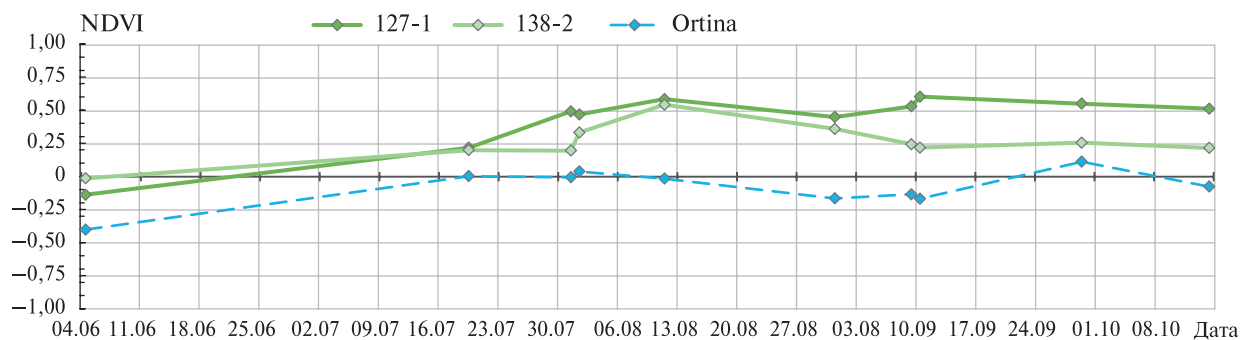


Рис. 8. График сезонной динамики индекса NDVI на площадках № 127 и 138 с подводной и единичными особями плавающей растительности (ПП = 50 и 25 % соответственно)

Таким образом, на площадках с наибольшим проективным покрытием (>60 %) NDVI остаётся высоким в течение всего вегетативного сезона вне зависимости от видового состава растительности. На площадках с разреженными сообществами (ПП < 30 %) значения NDVI в июне близки к значениям площадки на открытой воде. Ко второй половине июня они возрастают и остаются высокими даже в начале осени, что, вероятно, обусловлено высокой теплоёмкостью воды.

Анализ площадей покрытия водоёмов растительностью

Показатели ПП на выбранных площадках и рассчитанные значения NDVI оказались довольно близкими (рис. 9) — КК = 0,82. На основании этого результаты данных по площадкам были экстраполированы на всю поверхность озёр для приблизительной оценки проективного покрытия на всей площади водоёмов.

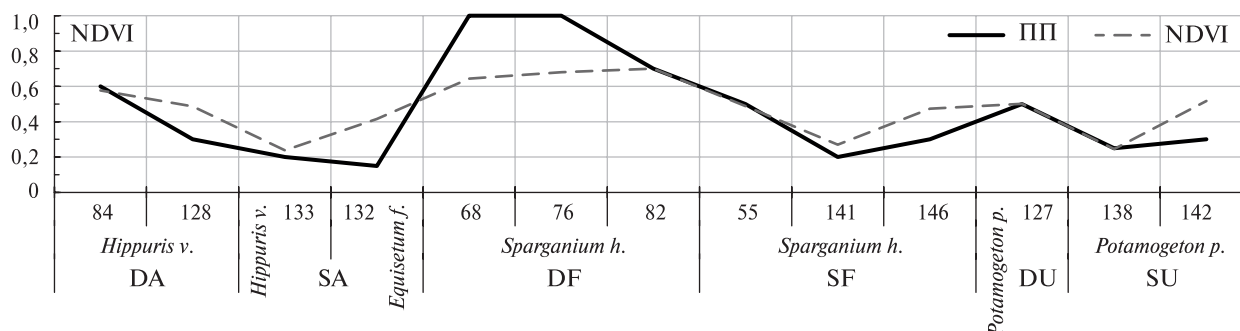


Рис. 9. Сравнение значений ПП некоторых площадок и значений NDVI: D — ПП = 0,3–1,0; S — ПП = 0,15–0,3; A — надводная растительность, F — плавающая растительность, U — подводная растительность

Таблица 4. Диапазоны значений NDVI для исследуемых озёр на основе снимка от 1 августа 2023 г.

Озеро	Происхождение	NDVI, %						Всего значений
		Среднее	<0	0–0,2	0,2–0,4	0,4–0,6	0,6–0,8	
5	П	0,290	0,0	1,5	98,5	0,0	0,0	137
9		0,252		8,7	91,3			138
16	Пвт	0,218		42,5	57,5			40
12	ТМ	–0,135	95,5	4,3	0,2			1321
11		20,102	94,3	5,7	0,0			633
19		20,068	91,8	8,2	0,0			2692
18		0,019	49,8	47,4	2,8			1113
13		0,050	15,0	83,6	1,3			226
1		0,116	0,3	93,7	6,0			300
17		ТТ	0,173	0,0	75,5	23,6	0,9	
3	ТМ	0,182		73,5	26,5	0,0		113
15		0,295		37,1	37,9	25,0		132
14		0,358	3,0	21,4	26,3	46,5	2,8	1584
22		0,236	0,0	7,1	92,9	0,0	0,0	14
2		0,290		0,0	100,0			25
10		0,313			98,0	2,0		51

Примечание: П — пойменное, Пвт — вторично-пойменное, ТМ — термокарстовое на минеральном субстрате, ТТ — термокарстовое на торфяном субстрате.

Для наглядности значения пикселей NDVI были распределены по интервалам (табл. 4). Это сразу позволило выявить озёра, наиболее бедные растительностью — № 11, 12 и 19, где 90 % значений NDVI пикселей оказались меньше нуля, что соответствует открытой воде. К числу озёр с невысоким покрытием водными растениями (ПП большей части пикселей до 20 %) были отнесены № 1, 3, 13 и 17. Наибольшая доля пикселей с ПП более 40 % наблюдалась в озёрах № 14 и 15. В остальных преобладали участки со средним проективным покрытием 20–40 %.

Среди термокарстовых озёр наибольшая доля пикселей с отрицательными значениями NDVI наблюдалась в наиболее крупных водоёмах (рис. 10). Исключением является озеро № 14: ПП в каждом из диапазонов от 0 до 20 и от 20 до 40 % свойственно более 20 % пикселей, а ПП в диапазоне 40–60 % — почти половине всех пикселей этого озера.

Заключение

По происхождению озёра района исследований были разделены на термокарстовые и пойменные. Преобладали озёра термокарстового происхождения, приуроченные к плоским минеральным водораздельным участкам. Пойменные озёра были представлены старицами и вторично-пойменными озёрами.

Во всех исследованных водоёмах воды были слабоминерализованные; по показателю pH в пойменных озёрах воды были нейтральные, в термокарстовых — нейтральные и слабокислые. Субстрат встречался песчаный, песчано-илистый и илистый. Флористический состав термокарстовых озёр насчитывал 22 вида сосудистых растений и мхов, в то время как в пойменных озёрах отмечены лишь 9 видов из 22 выявленных в исследованных водоёмах.

По данным дистанционного зондирования были вычислены индексы NDTI, NDWI, MNDWI и NDVI, которые позволили оценить изменения в спектральных характеристиках озёр, происходящие при цветении воды.

Индекс NDTI крайне слабо изменялся на протяжении сезона, оставаясь в пределах 0,3 для большинства озёр. Увеличение значений наблюдалось в начале июня у озёр с наиболее крутыми берегами вследствие сноса взвешенных частиц с тальми водами, а также у некоторых озёр наблюдалось увеличение значений во время цветения воды из-за активного размножения фитопланктона.

При сравнении значений водных индексов до и во время цветения воды обнаружилось довольно значительное снижение (NDWI до 0,34, MNDWI до 0,68) значений для некоторых озёр.

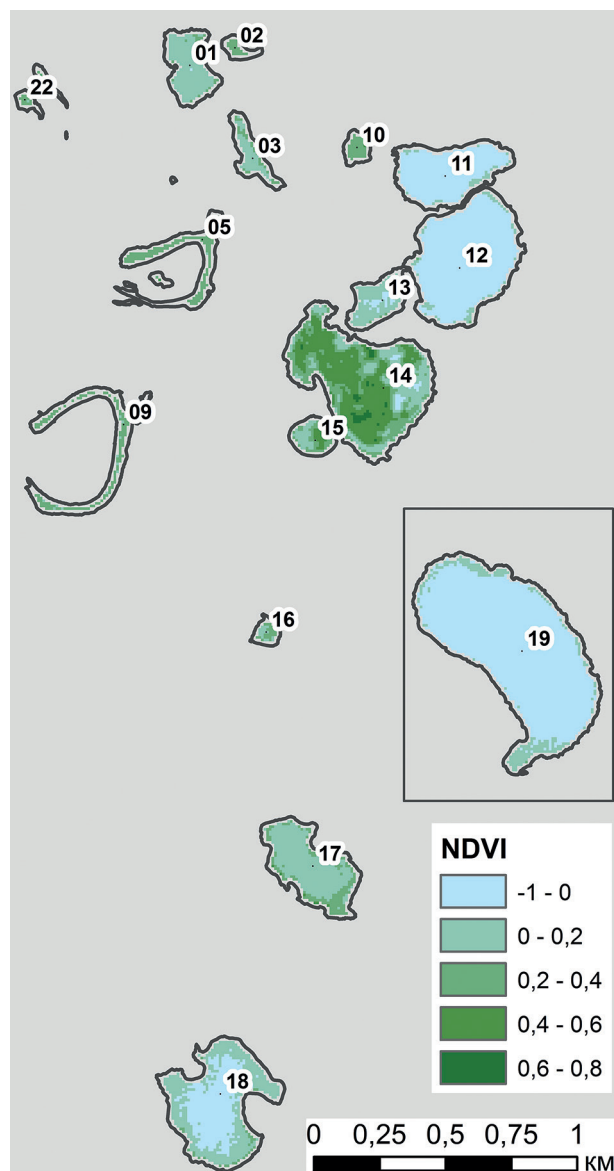


Рис. 10. Распределение значений NDVI в исследованных озёрах

Индекс NDVI сильно варьировал: в некоторых озёрах преобладали отрицательные значения, свидетельствующие об открытой воде, также были озёра, где средние значения индекса за весь период исследования не опускались ниже нуля. Наиболее заметно индекс отреагировал на цветение воды в озере № 10: 11 августа пиковые средние значения NDVI были на 0,2 выше в сравнении с более ранним снимком.

В озёрах № 2, 12, 13, 14, 15, 18, 19, 22 существенно ($>0,2$) не откликнулся ни один из использованных индексов, что говорит о слабой интенсивности или отсутствии цветения воды 11 августа. На изменения отражательных свойств озера № 10 значительно отреагировали все четыре индекса, озера № 3 — NDWI и MNDWI. Сильное изменение значений в озере № 5 было обнаружено только индексом MNDWI, в озере № 17 — только NDTI.

Данные о макрофитах, полученные в ходе полевых работ, позволили сравнить фактические значения проективного покрытия со спутниковыми данными, а также отследить динамику развития водных сообществ с известными доминантами.

На площадках с наибольшим проективным покрытием ($>60\%$) значения NDVI оставались высокими в течение всего вегетативного сезона вне зависимости от самой растительности. На площадках с разреженными сообществами (ПП $< 30\%$) значения NDVI в июне близки к значениям площадки на открытой воде. Ко второй половине июня они возрастали и оставались высокими даже в начале осени, что, вероятно, обусловлено высокой теплоёмкостью воды.

При сравнении значений проективного покрытия геоботанических площадок и NDVI корреляция оказалась довольно высока (КК = 0,82), что позволило попиксельно оценить проективное покрытие каждого озера. Для пойменных озёр преобладало покрытие в 20–40 %. Для термокарстовых озёр значения сильно различались в зависимости от размера озера: в крупных озёрах была высокая доля пикселей с отрицательными значениями NDVI, соответствующая отсутствию (или наличию крайне низкой) зелёной растительности; в озёрах меньшего размера повышалась доля пикселей с более высокими значениями NDVI и, соответственно, с более высоким проективным покрытием. Исключением стало озеро № 14: при крупном размере озера (190,9 тыс. м²) более 90 % его пикселей имели значения NDVI от 0 до 0,6, половина из них приходилась на интервал 0,4–0,6.

Таким образом, при сравнении пойменных и термокарстовых озёр района исследований были выявлены следующие особенности. Воды пойменных озёр были отнесены к нейтральным, термокарстовых — к нейтральным и слабокислым. В пойменных озёрах количество видов сосудистых растений и мхов было значительно меньше. Спектральные показатели не выявили различий между озёрами на основе их происхождения — другие факторы имели большее значение. Анализ NDVI водного зеркала показал, что до начала цветения воды пойменным озёрам были наиболее свойственны значения в интервале 0,2–0,4, в то время как значения термокарстовых озёр варьировали от отрицательных до 0,6 в зависимости от размера.

Литература

1. Бондаренко Л. Г., Кульба С. Н., Петрашов В. И. и др. Оценка зарастания водной растительностью Челбасской группы азовских лиманов // Водные биоресурсы и среда обитания. 2021. Т. 4. № 4. С. 14–26. DOI: 10.47921/2619-1024_2021_4_4_14.
2. Вехов Н. В., Кулиев А. Н. Распространение гидрофильных растений на Северном Тимане, в Малоземельской и на западе Большеземельской тундры // Ботанический журн. 1986. Т. 71. № 9. С. 1241–1248.
3. Голдина Л. П. Озера восточной части Большеземельской тундры (в бассейнах рек Адзъва, Коротаиха, Большая Роговая и Сейда-Ю) // Типология озёр. 1972. С. 159–172.
4. Гудилин И. С. Ландшафтная карта СССР масштаб 1:2 500 000 / Министерство геологии СССР. Гидроспецгеология. 1980. 172 с.
5. Исаченко А. Г. Ландшафтная карта СССР. Масштаб 1: 4 000 000. Л.: Изд-во Ленинградского ун-та. 1985. 320 с.

6. Поддубный С. А., Чемерис Е. В., Кутузов А. В. и др. Динамика высшей водной растительности защищённого мелководья в связи с уровнем воды в Волжском плёсе Рыбинского водохранилища // Биология внутренних вод. 2022. № 2. С. 136–146. DOI: 10.31857/S0320965222020085.
7. Флора и фауна водоемов Европейского Севера (на примере озер Большеземельской тундры). Л.: Наука. 1978. 192 с.
8. Gao B.-C. NDWI — A Normalized Difference Water Index for remote sensing of vegetation liquid water from space // Remote Sensing of Environment. 1996. V. 58. No. 3. P. 257–266. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3).
9. Lacaux J. P., Tourre Y. M., Vignolles C. et al. Classification of ponds from highspatial resolution remote sensing: Application to Rift Valley Fever epidemics in Senegal // Remote Sensing of Environment. 2006. V. 106. P. 66–74. DOI 10.1016/j.rse.2006.07.012.
10. Liu A., Chen Y., Cheng X. Monitoring thermokarst lake drainage dynamics in Northeast Siberian coastal tundra // Remote Sensing. 2023. V. 15. No. 18. DOI: 10.3390/rs15184396.
11. Rouse J. W., Haas R. H., Scheel J. A., Deering D. W. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS // Proc. 3rd Earth Resource Technology Satellite Symp. (ERTS). 1974. V. 1. P. 48–62.
12. Urbanski J. A. Monitoring and classification of high Arctic lakes in the Svalbard Islands using remote sensing // Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation. 2022. V. 112. No. 112. DOI: 10.1016/j.jag.2022.102911.
13. Xu H. Modification of Normalised Difference Water Index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery // Intern. J. Remote Sensing. 2006. V. 27. No. 14. DOI: 10.1080/01431160600589179.

Investigation of tundra lakes' ecological features by applying spectral indices

K. I. Simonova, N. V. Tsyvkunova

*Komarov Botanical Institute RAS, Saint Petersburg 197376, Russia
E-mail: KSimonova@binran.ru*

Arctic lake ecosystems are highly dynamic and very important for the flora and fauna of the northern territories. Currently, they are experiencing high anthropogenic pressure, which necessitates monitoring of their condition and vegetation. Conducting large-scale field studies in remote and inaccessible territories is very problematic, however remote methods provide relevant information. This work is devoted to the study of ecological features and vegetation of 16 tundra lakes in the west of Bolshezemelskaya tundra in the Ortina River basin based on field investigations carried out in 2023 and remote sensing data. For each lake, geobotanical descriptions with pH and salinity recording were carried out, morphometric indices and lake origin were determined. The calculated NDTI (Normalized Difference Turbidity Index), NDWI (Normalized Difference Water Index), MNDWI (Modified Normalized Difference Water Index) and NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) were used to study the response of the water surface to increased amount of suspended solids and water blooms during the vegetative season. A high correlation between NDVI values and projective vegetation coverage estimates made in field allows calculating projective coverage of the studied lakes by water plants.

Keywords: lake, tundra, Arctic, vegetation, remote sensing, NDTI, NDWI, MNDWI, NDVI

Accepted: 18.09.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-5-249-262

References

1. Bondarenko L. G., Kul'ba S. N., Petrashov V. I. et al., Assessment of overgrowth of the Chelbas group of the Azov Sea Limans with aquatic vegetation, *Aquatic Bioresources and Environment*, 2021, Vol. 4, No. 4, pp. 14–26 (in Russian), DOI: 10.47921/2619-1024_2021_4_4_14.

2. Vekhov N. V., Kuliev A. N., Distribution of hydrophilic plants in the Northern Timan, Malozemelskaya and in the west of Bolshezemelskaya tundra), *Botanicheskii zhurnal*, 1986, Vol. 71, No. 9, pp. 1241–1248 (in Russian).
3. Goldina L. P., Lakes in the eastern part of the Bolshezemelskaya tundra (in the basins of the rivers Adzva, Korotaikha, Bolshaya Rogovaya and Seida-Yu), *Tipologiya ozer*, 1972, pp. 159–172 (in Russian).
4. Gudilin I. S., *Landshaftnaya karta SSSR masshtaba 1: 2 500 000* (Landscape map of the USSR at a scale of 1:2 500 000), Ministerstvo geologii SSSR, Gidrospektgeologiya, 1980, 172 p. (in Russian).
5. Isachenko A. G., *Landshaftnaya karta SSSR. Masshtab 1: 4 000 000* (Landscape map of the USSR. Scale 1:4 000 000), Leningrad: Izd. Leningradskogo universiteta, 1985, 320 p. (in Russian).
6. Poddubnyi S. A., Chemeris E. V., Kutuzov A. V. et al., Dynamic of higher aquatic vegetation of protected shallow water in relation to water-level regime in the Volga Reach of the Rybinsk Reservoir, *Inland Water Biology*, 2022, Vol. 15, No. 2, pp. 129–138, DOI: 10.31857/S0320965222020085.
7. *Flora i fauna vodoemov Evropeiskogo Severa (Na primere ozer Bol'shezemel'skoi tundry)* (Flora and fauna of water bodies of the European North (On the example of lakes of Bolshezemelskaya tundra)), Leningrad: Nauka, 1978, 192 p. (in Russian).
8. Gao B.-C., NDWI — A Normalized Difference Water Index for remote sensing of vegetation liquid water from space, *Remote Sensing of Environment*, 1996, Vol. 58, No. 3, pp. 257–266, [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3).
9. Lacaux J. P., Tourre Y. M., Vignolles C. et al., Classification of ponds from highspatial resolution remote sensing: Application to Rift Valley Fever epidemics in Senegal, *Remote Sensing of Environment*, 2006, Vol. 106, pp. 66–74, DOI 10.1016/j.rse.2006.07.012.
10. Liu A., Chen Y., Cheng X., Monitoring thermokarst lake drainage dynamics in Northeast Siberian coastal tundra, *Remote Sensing*, 2023, Vol. 15, No. 18, DOI: 10.3390/rs15184396.
11. Rouse J. W., Haas R. H., Scheel J. A., Deering D. W., Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS, *Proc. 3rd Earth Resource Technology Satellite Symp. (ERTS)*, 1974, Vol. 1, pp. 48–62.
12. Urbanski J. A., Monitoring and classification of high Arctic lakes in the Svalbard Islands using remote sensing, *Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2022, Vol. 112, No. 112, DOI 10.1016/j.jag.2022.102911.
13. Xu H., Modification of Normalised Difference Water Index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery, *Intern. J. Remote Sensing*, 2006, Vol. 27, No. 14, DOI: 10.1080/01431160600589179.