

Геоинформационный анализ ландшафтной дифференциации дренированных озёрных котловин Юго-Востока Большеземельской тундры

© 2025. Д. А. Каверин¹, д. г. н., с. н. с., С. В. Якубенко², аспирант,
С. В. Денева¹, к. б. н., н. с., А. В. Пастухов¹, д. б. н., с. н. с.,

¹Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения
Российской академии наук,

167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,

²Сыктывкарский государственный университет имени Питирима Сорокина,
167001, Россия, г. Сыктывкар, Октябрьский пр., д. 55,

e-mail: dkav@mail.ru

Охарактеризована пространственная дифференциация ландшафтных разностей дренированных озёрных котловин, полученная на основе спектрального анализа поверхности почвенно-растительного покрова по спутниковым изображениям. Исследования проведены на ключевом участке, расположенном на юго-востоке Большеземельской тундры, где в конце 1970-х гг. искусственно осушили десятки озёрных котловин. Оценка закономерностей ландшафтной дифференциации как на уровне отдельных природно-территориальных комплексов, так и их групп может проводиться с использованием комплекса методов геоинформационного, статистического и классификационного анализа. В настоящее время в осушенных котловинах преобладают ивняковые и ерниковые тундры, меньше представлены луговины и мочажины. Проведена группировка ландшафтных разностей котловин по преобладающему составу растительности и степени дренированности. Для характеристики ландшафтной дифференциации котловин предложена классификация с использованием аббревиатурно-цифровых формул. Исследуемые котловины классифицируются преимущественно как умеренно-закустаренные среднедренированные. Рассчитаны статистические связи между значениями спектральных индексов и структурой ландшафтных разностей. Выявлены коррелятивные связи между количественными значениями спектральных индексов, определёнными уровнями закустаренности и дренированности котловин. Использование комплекса методов показало, что осушенные более сорока лет назад котловины стабилизировались в аспекте ландшафтной дифференциации. Апробирование комплекса методов для естественно-осушенных котловин показало возможность его применения и для других территорий Большеземельской тундры.

Ключевые слова: искусственно осушенные озёрные котловины, природно-территориальные комплексы, спектральные индексы, данные дистанционного зондирования.

Landscape differentiation of drained lake basins in the Southeast of Bolshezemelskaya tundra based on geoinformation analysis

© 2025. D. A. Kaverin¹ ORCID: 0000-0003-2559-2340^{*}

S. V. Yakubenko² ORCID: 0009-0005-2992-3938^{*}

S. V. Deneva¹ ORCID: 0000-0002-1813-7799^{*}, A. V. Pastukhov¹ ORCID: 0000-0001-9368-9270^{*}

¹Institute of Biology of Komi Science Centre of the Ural Branch
of the Russian Academy of Sciences,

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

²Pitirim Sorokin Syktyvkar State University,

55, Oktyabrsky Ave., Syktyvkar, Russia, 167001,

e-mail: dkav@mail.ru

The spatial differentiation of landscape varieties of drained lake basins is characterized, based on spectral analysis of land cover surface using satellite images. The studies were conducted at the key site located in the southeast of the Bolshezemelskaya Tundra, where dozens of lake basins were artificially drained in the late 1970s. Assessment of landscape differentiation patterns both at the level of individual natural territorial complexes and their groups can be carried out using a set of geoinformation, statistical and classification analysis methods. At present, willow and dwarf-shrub tundra predominate in the drained lake basins, whereas meadows and swampy hollows are less represented. The landscape differences of the basins are grouped according to the dominant vegetation and degree of drainage. Classification using abbreviation-numerical

formulas is proposed to characterize landscape differentiation of the basins. The studied basins are classified mainly as moderately bushy medium-drained. Statistical relationships between the values of spectral indices and the structure of landscape differences are calculated. Correlative relations between quantitative values of spectral indices, identified levels of bushiness and drainage degree of the basins are defined. Application of the complex of methods shows that the basins drained more than forty years ago have stabilized in the aspect of landscape differentiation. Testing of the complex of methods for naturally drained basins reveals the possibility of the method application for other areas of the Bolshezemelskaya tundra.

Keywords: artificially drained lake basins, natural-territorial complexes, spectral indices, remote sensing data.

Тундровые термокарстовые озёра и дренированные озёрные котловины занимают значительные площади в криолитозоне [1], где только озёрно-болотные ландшафты занимают до 1/5 её территории [2]. Дренажирование термокарстовых озёрных котловин в криолитозоне происходит непрерывно под влиянием климатических и ландшафтных факторов [3, 4]. Дренаж термокарстовых озёрных котловин в низменных равнинах приводит к широкому формированию болотных ландшафтов [5]. После дренажа в озёрных котловинах формируются растительный и почвенный покровы, активизируются геоморфологические процессы, протекают значительные ландшафтные преобразования [6, 7]. Осушенные озёрные котловины постепенно заболачиваются и зарастают кустарниковой растительностью, в них меняется мерзлотная обстановка [8].

Термокарстовые озёрные котловины широко распространены в криолитозоне Печорской низменности [9]. На востоке Большеземельской тундры водораздельные ландшафты характеризуются высокой степенью заболоченности и заозёрности. В 1970–80 гг. в рамках исследовательских и сельскохозяйственных программ на ключевом участке юго-востока Большеземельской тундры было осушено около 40 озёр общей площадью 1000 га [10]. В 1980–90-е гг. в осушенных озёрных котловинах сформировались преимущественно травяные сообщества. К концу 1990-х гг. в котловинах стали постепенно формироваться естественные тундровые ландшафты.

Сукцессионные изменения растительного покрова котловин тесно взаимосвязаны с ландшафтными трансформациями, активно в них происходящими в первые десятилетия после дренажа. В первые двадцать лет после дренажа котловины переходят в новое экологическое состояние, растительный покров активно формируется на почвенно-грунтовой субстрате, обогащённом питательными элементами [11]. Озёрный дренаж обеспечивает благоприятные условия для формирования и быстрой экспансии растительного покрова на относительно тёплых, влажных и плодородных грунтах [7]. Со временем самовосстано-

вительная сукцессия естественной тундровой растительности происходит по различным сценариям в зависимости от ландшафтных и локальных условий [12]. Ландшафтное разнообразие внутри котловин определяется комплексом факторов, прежде всего литологией и рельефом [13]. Изменения растительного покрова сопровождаются формированием специфических почв и значительной трансформацией мерзлотной обстановки [14].

Дренированные термокарстовые котловины хорошо распознаются на аэро- и космоснимках. Известно, что спектральные характеристики дренированных котловин меняются с их возрастом [15]. Оценка сукцессионных изменений растительности, спектральные и текстурные характеристики ландшафта в осушенных котловинах используются для определения их относительного возраста [16]. Анализ спутниковых вегетационных индексов показал значительный эффект «озеленения» Арктики в условиях глобального потепления [17, 18]. На общем фоне «озеленения» для экосистем Арктики характерна высокая мозаичность в данном показателе [19].

В настоящее время изучение закономерностей ландшафтной дифференциации, основанной на разнообразии почвенно-растительного покрова дренированных озёрных котловин, остаётся открытым научным вопросом, требующим проведения дальнейших исследований. Активное развитие геоинформационных систем в последние десятилетия открывает новые возможности исследований быстро меняющихся ландшафтов криолитозоны [20]. В связи с вышесказанным, сформулирована цель исследований – определить закономерности ландшафтной пространственной дифференциации искусственно-осушенных озёрных котловин на основе анализа данных дистанционного зондирования почвенно-растительного покрова.

Объекты и методы исследования

Участок исследований находится в юго-восточной части Большеземельской тундры в урочище Пятембой-Гладь в бассейне среднего течения р. Большой Роговой, при-

тока р. Усы (рис. 1). Территория относится к Заполярному административному району Ненецкого автономного округа. В геоморфологическом отношении территория представлена плоской низменной равниной высотой 90–100 м над уровнем моря. Плоские слабодренированные участки равнины покрыты бугристо-мочажинными болотами с оголёнными торфяными пятнами и термокарстовыми озёрами, занимающими 8–12% территории. Почвообразующие породы представлены в основном четвертичными флювиогляциальными и болотно-озёрными образованиями [10]. Диаметр озёрных котловин, около 90% которых заполнено водой, варьирует от 25 до 1000 м. Днища озёрных котловин сложены преимущественно песками, суглинками и глинами [21].

Среднегодовая температура воздуха территории исследований составляет минус 5,8 °С, среднегодовое количество осадков составляет 600–650 мм. Участок исследований расположен в подзоне преимущественно сплошного распространения многолетнемёрзлых пород (ММП) мощностью 200–300 м и среднегодовой температурой -1...-2 °С [22]. Широкому распространению ММП способствует высокая доля болотных ландшафтов в урочище. Талики существуют под заполненными водой озёрными котловинами глубиной более 5 м [21].

В соответствии с геоботаническим районированием территория исследований относится к Пятембойскому геоботаническому району Воркутинского геоботанического округа [23]. На плакорах широко распространены кустарниковые (ерниковые и ивняковые) и мохово-кустарничковые тундры, занимающие около 60% территории [24]. Крупными массивами они располагаются на различных элементах рельефа, в особенности на пологих склонах. Высота кустарниковых ярусов варьирует от 0,2 до ≥1 м, достигая максимума в нижних частях склонов. На дренированных приречных песчаных террасах произрастают мохово-лишайниковые и мохово-кустарничковые тундры. На плоских водоразделах и в понижениях рельефа развиты заболоченные травяно-моховые и кустарничково-травяно-моховые тундры, вдоль линий стока – травяные ивняки. В урочище широко распространены плоскобугристые болота с кустарничковой и осоково-сфагновой растительностью.

В районе исследований широко распространены торфяные олиготрофные мерзлотные почвы, торфяно-глеезёмы (в том числе мерзлотные), глеезёмы криометаморфические, пойменные аллювиальные почвы. В дренированных условиях речных долин встречаются глеезёмы поточно-гумусовые [25].

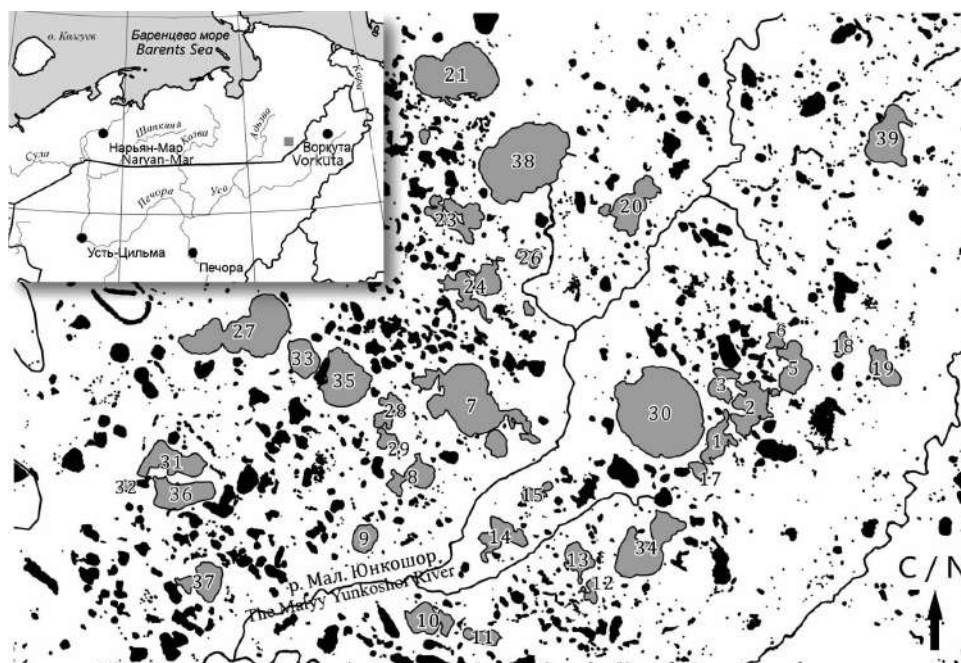


Рис. 1. Географическое положение объектов исследований на ландшафтном уровне. На карте-вставке в левом верхнем углу показано расположение района исследования на региональном уровне. Нумерация дренированных котловин представлена цифрами

Fig. 1. Geographical location of the research objects at the landscape level. The inset map in the upper left corner shows the location of the study area at the regional level. Drained basins are presented as numbers

Д. А. Каверин, С. В. Якубенко, С. В. Денева, А. В. Пастухов
 «Геоинформационный анализ ландшафтной дифференциации
 дренированных озёрных котловин
 Юго-Востока Большеземельской тундры». С. 26.

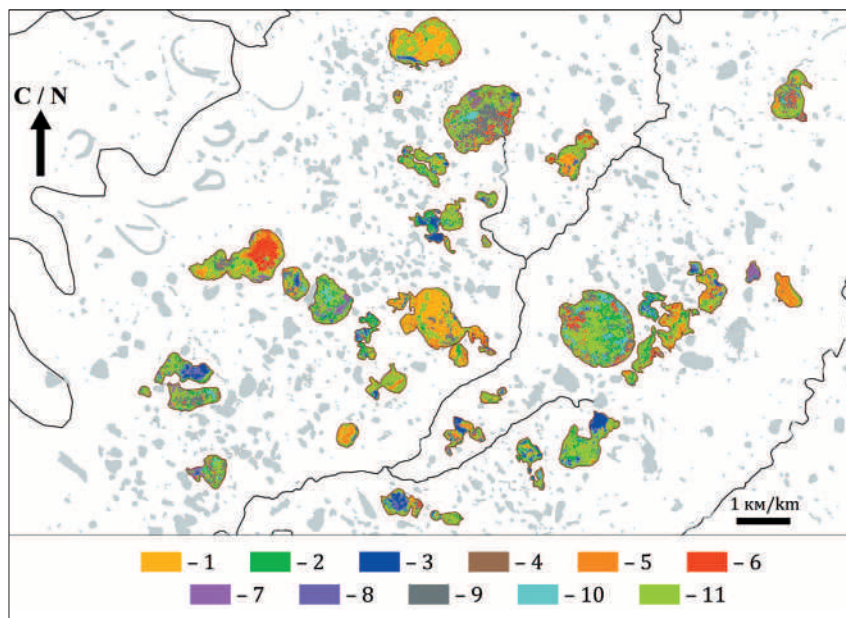


Рис. 2. Ландшафтная дифференциация осушенных котловин, выполненная на основе геоинформационного анализа. Природно-территориальные комплексы (здесь и на рис. 4, 5): 1 – веяниково-осоковые луговины; 2 – ивняковые заболоченные тундры; 3 – остаточные озёрца; 4 – кустарничково-моховые тундры; 5 – осоковые луговины с открытой водой; 6 – осоковые заболоченные луговины; 7 – моховые мочажины; 8 – хвощевые мочажины с открытой водой; 9 – ерниковые тундры; 10 – травяные мочажины с открытой водой; 11 – ивняковые тундры

Fig. 2. Landscape differentiation of drained lake basins based on geoinformation analysis. Natural-territorial complexes (here and in Fig. 4, 5): 1 – reed grass-sedge meadows; 2 – willow swamp meadows; 3 – residual lakes; 4 – prostrate shrub-moss tundra; 5 – sedge meadows with open water; 6 – marshy sedge meadows; 7 – moss swampy hollows; 8 – horsetail swampy hollows with open water; 9 – dwarf-shrub tundra; 10 – grass swampy hollows with open water; 11 – willow tundra

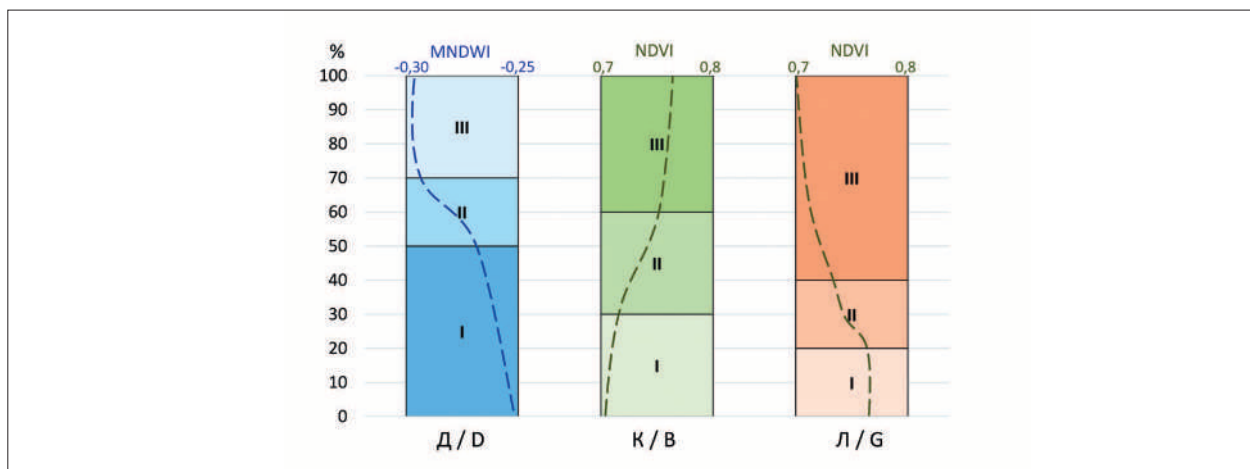


Рис. 3. Ландшафтная классификация дренированных озёрных котловин Большеземельской тундры по степени: Д – дренированности, К – закустаренности, Л – залуженности; выраженность: I – слабая, II – средняя, III – сильная. Пунктирными линиями показаны графики средних значений спектральных индексов

Fig. 3. Landscape classification for drained lake basins in Bolshezemelskaya tundra by degree: D – drained, B – bushiness, G – grassed; intensity: I – weak, II – medium, III – strong. Dotted lines show graphs of average values of spectral indices: MNDWI – Modified Normalized Difference Water Index, NDVI – Normalized Difference Vegetation Index

Д. А. Каверин, С. В. Якубенко, С. В. Денева, А. В. Пастухов
«Геоинформационный анализ ландшафтной дифференциации
дренированных озёрных котловин
Юго-Востока Большеземельской тундры». С. 26.

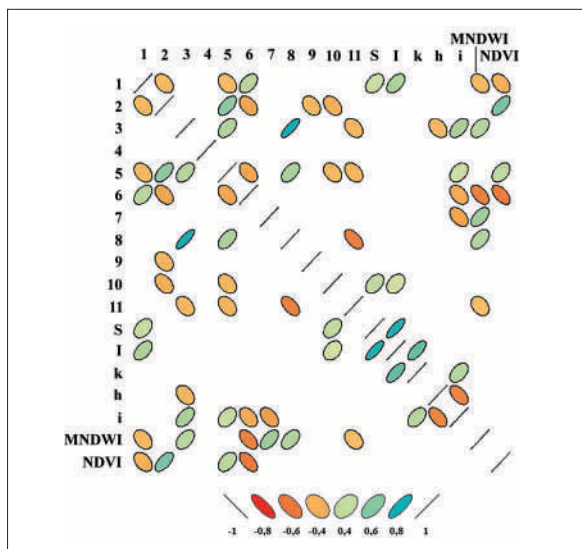


Рис. 4. Статистически значимые значения коэффициентов корреляции по Спирмену ($p < 0,05$) между площадью различных типов природно-территориальных комплексов (обозначены цифрами), морфометрическими характеристиками озёрных котловин и их спектральными индексами. Морфометрические характеристики: S – площадь, га; I – длина береговой линии, км; k – коэффициент извилистости береговой линии; h – абсолютная высота, м; i – уклон береговой линии, градусы. Спектральные индексы: NDVI, MNDWI / **Fig. 4.** Statistically significant values of Spearman correlation coefficients ($p < 0.05$) between the area of different types of natural territorial complexes (indicated by numbers), morphometric characteristics of lake basins and their spectral indices. Morphometric characteristics: S – area, ha; I – coastline length, km; k – coefficient of coastline tortuosity; h – absolute height, m; i – coastline slope, degrees. Spectral indices: NDVI, MNDWI

А. Д. Деменев, Н. Г. Максимович, О. А. Березина, А. А. Мизев, В. Т. Хмурчик **«Комплексный анализ качества поверхностных вод на основе данных дистанционного зондирования Земли, замеров автоматизированных датчиков и натурных исследований». С. 46.**

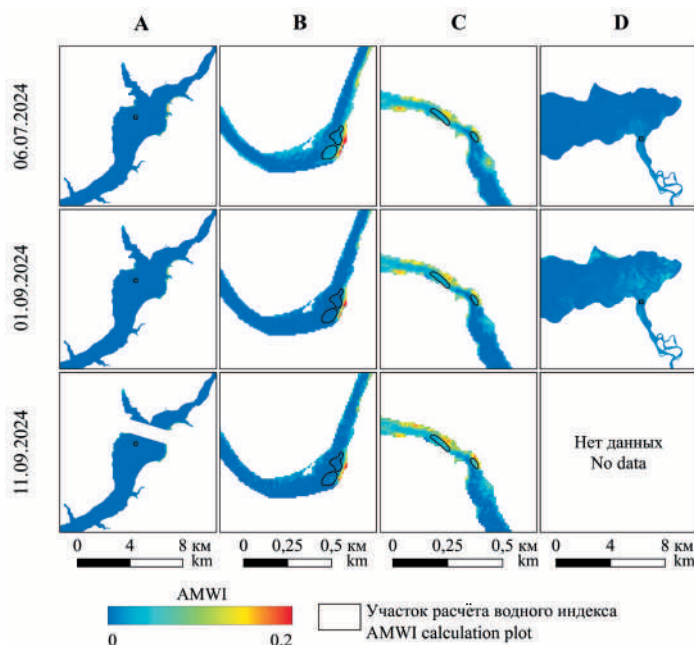


Рис. 2. AMWI для контролируемых участков р. Косьвы (2024 г.)

А – Широковское водохранилище, фон; В – р. Косьва ниже впадения шахтных вод из шахты 40 лет Октября; С – р. Косьва, район разгрузки шахтных вод из шахты им. Калинина; D – Камское водохранилище, устье р. Косьвы / **Fig. 2.** AMWI of the Kosva River studied sites (2024 yr.)
 A – Shirokovskoe reservoir, background; B – the Kosva River downstream the discharge of the 40 years of the October mine; C – the Kosva River downstream the discharge of the Kalinin mine; D – Kama reservoir, the Kosva River estuary

Полевые исследования. В полевых условиях выполнили ландшафтные описания, включая определение типов природно-территориальных комплексов и почв. Исследования проведены в вегетационный период 2023 г. Всего выполнено 42 географических привязанных ландшафтных описания, где были определены основные типы ландшафтных разностей на уровне фаций. В данной работе при их характеристике использовали термин природно-территориальные комплексы (ПТК). Наименования выделенных типов ПТК базируются на основе названий растительных сообществ.

Подготовительный этап. Для исследований ландшафтной дифференциации использованы космические снимки Landsat и Sentinel-2 в мультиспектральном диапазоне, публикуемые в открытом доступе [26]. Выбрана серия мультиспектральных снимков двух периодов года: летние (3 шт.) и осенние (3 шт.) за 2021–2023 гг. Обработка космических снимков производилась в программной среде QGIS 3.24. При сравнении космоснимков выявлено, что наибольший контраст ландшафтов как внутри дренированных котловин, так и между ними и окружающими ландшафтными разностями проявляется в осенний период при использовании комбинации каналов: красный (B04), ближний инфракрасный (B08) и коротковолновый (B12). Для выделения современной водной поверхности создали маску водных пространств с использованием ближнего инфракрасного канала B06 (Sentinel-2). Созданный слой наложили на топографическую карту 1963 г., отображающую большее, чем в настоящее время, количество озёрных котловин, заполненных водой. Все объекты, являющиеся озёрами на карте 1963 г. и отсутствующие на современном космоснимке, приравнены к осушенным котловинам. В результате определено 37 озёрных котловин, дренаж которых был проведён в 1979 г. [10]. В качестве контрольных объектов использовали 2 естественно-дренированные озёрные котловины площадью более 100 га.

Геоинформационный анализ. Классификацию спутниковых снимков с использованием полученных полевых данных проводили в несколько этапов: 1) создание сигнатур искомым типам ПТК; 2) классификация раstra по методу максимального подобия с помощью инструмента i.smap на основании значений красного, ближнего инфракрасного и коротковолнового каналов (4, 8, 12 в Sentinel); 3) векторизация раstra (инструмент r.to.vect)

с расчётом площади полигонов. Для классов в обучающей выборке задали следующие условия: максимальная гомогенность и размер обучающего контура не менее 12 пикселей. Для выделенных типов ПТК в осушенных котловинах рассчитали абсолютные и относительные значения площадей, значения спектральных индексов NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) и MNDWI (Modified Normalized Difference Water Index), морфометрические характеристики (длина береговой линии, коэффициент извилистости, отношение площади к периметру, высота над уровнем моря, уклон береговой линии).

Статистический анализ. Статистический анализ соотношений площадей типов ПТК со спектральными индексами и морфометрическими характеристиками дренированных котловин с дальнейшей визуализацией результатов проводили в программах Microsoft Excel 2010, IBM SPSS и пакете R [27]. Оценка взаимосвязей исследуемых характеристик в анализе проводилась при помощи непараметрического метода – ранговой корреляции Спирмена [28]. Дендрограмму сходства объектов строили методом взвешенного среднего в программе STATISTICA 6.0. В качестве меры различия применяли евклидово расстояние (E.d.).

Результаты и обсуждение

Классификационный анализ ландшафтной дифференциации. Результаты исследований показали, что общая площадь искусственно-осушенных озёрных котловин составила 985 га, или 7,8% от площади рассматриваемого урочища. Для искусственно осушенных котловин рассчитаны средние показатели: площади – $26,6 \pm 4,5$ га, длины береговой линии – $2,6 \pm 0,3$ км, коэффициента извилистости – $1,5 \pm 0,1$, отношения площади к периметру – $1,5 \pm 0,1$, высоты дна над уровнем моря – 85 ± 1 м, уклона береговой линии – $2,9 \pm 0,1\%$.

На основании полевых исследований и классификации спутниковых изображений выделено 11 типов ПТК, характеризующих современную ландшафтную дифференциацию осушенных озёрных котловин (табл., рис. 2, см. цв. вкладку II). Больше в котловинах распространены ивняковые и ерниковые тундры, меньше представлены луговины и мочажины. Среди луговин преобладают (~18%) растительные сообщества с доминированием или значительным участием осок. Относительная доля ПТК с участками открытой воды

Таблица / Table

Площади основных типов природно-территориальных комплексов (ПТК) в осушенных озёрных котловинах / The areas of main types of natural-territorial complexes (NTC) in drained lake basins

Типы ПТК NTC type	Площадь, га Area, ha	Доля площади, % Share of area, %
Ивняковые тундры / Willow tundra	412,0	41,6
Ивняковые заболоченные тундры / Willow swamp tundra	107,5	14,2
Ерниковые тундры / Dwarf-shrub tundra	96,2	10,1
Осоковые заболоченные луговины / Marshy sedge meadows	88,9	7,5
Хвощовые мочажины с открытой водой / Horsetail swampy hollows with open water	71,5	5,0
Моховые мочажины / Moss swampy hollows	61,2	4,5
Осоковые луговины с открытой водой / Sedge meadows with open water	39,3	4,4
Остаточные озёрца / Residual lakes	37,8	4,3
Травяные мочажины с открытой водой / Grass swampy hollows with open water	30,2	4,1
Вейниково-осоковые луговины / Reed grass-sedge meadows	28,2	2,6
Кустарничково-моховые сообщества / Prostrate shrub-moss communities	12,7	1,7
Итого / Total	100,0	986,0

составляет 13,5%, непосредственно водная поверхность в пределах котловин занимает 4,3% (табл.).

По типу растительности ПТК котловин дифференцировали на 3 группы: крупнокустарниковые (К), мохово-кустарничковые (М) и луговые (Л). Крупнокустарниковые тундры ($55,7 \pm 2,5\%$ площади) включают в себя ивняковые, в т. ч. заболоченные растительные сообщества. Мохово-кустарничковые тундры занимают меньшие площади ($16,4 \pm 2,0\%$) и представлены кустарничковыми, ерниковыми и моховыми сообществами. На площадь ПТК с луговыми сообществами, состоящими из осоковых луговин и мочажин, приходится около четверти площади всех котловин ($23,6 \pm 2,6\%$).

По степени закустаренности все котловины разделили на слабозакустаренные ($K_I < 30\%$), среднезакустаренные ($K_{II} = 30-60\%$) и сильнозакустаренные ($K_{III} > 60\%$) (рис. 3, см. цв. вкладку II). Классификацию по степени закустаренности сделали на основе показателей, принятых в физической географии и почвоведении. Около 90% всех осушенных котловин в настоящее время являются среднеили сильнозакустаренными. Ландшафтное разнообразие котловин можно выразить и по степени присутствия ПТК с луговой растительностью. По степени залуженности котловины разделили на слабозалуженные ($L_I < 20\%$), среднезалуженные ($L_{II} = 20-40\%$) и сильнозалуженные ($L_{III} > 40\%$). Данное разделение основано на использовании медианных значений доли луговых ПТК. Коэффициент корреляции между долями крупнокустар-

никовых и луговых ПТК составляет -0,7. Остальные площади заняты ПТК с тундровыми сообществами, где доминирует ерниковая, кустарничковая и моховая растительность. На основе сочетаний присутствия крупнокустарниковой и луговой растительности можно выделить 9 комбинаций ПТК, среди которых наиболее распространёнными являются $K_{III}L_I$, $K_{II}L_{II}$, $K_{II}L_{III}$.

Исследуемые типы ПТК дифференцировали по степени дренированности: относительно дренированные (Д), заболоченные (З) и обводнённые (О). Остаточные озёрца в обводнённый тип не включили. Относительно дренированные ПТК ($56,0 \pm 2,8\%$ площади) включают в себя вейниково-осоковые луговины, кустарничково-моховые, ерниковые и ивняковые тундры. Заболоченные ПТК ($26,2 \pm 2,5\%$) представлены заболоченными ивняковыми тундрами, осоковыми луговинами и моховыми мочажинами. Обводнённые ПТК ($13,5 \pm 1,5\%$) состоят из осоковых, хвощевых и травяных мочажин. Степень дренированности территории отдельных котловин оценивали по доле ландшафтов группы Д (диапазон 11–80%). Градацию выборки по степени присутствия относительно дренированных ландшафтов условно разделили на 3 класса: слабодренированные D_I ($D < 50\%$), умеренно-дренированные D_{II} ($D = 50-70\%$) и дренированные D_{III} ($D > 70\%$). Большая часть котловин является умеренно-дренированными D_{II} (17 из 37 рассматриваемых), средняя доля дренированных ландшафтных разностей в них составила $56,6 \pm 4,9\%$.

Сочетание обеих (по растительности и степени дренированности) классификационных схем можно описать с использованием кратких аббревиатурных формул. К примеру, если степень дренированности котловины № 13 составила 41%, закустаренности 59%, залуженности 22%, её пространственную ландшафтную структуру можно выразить формулой $D_{41}/K_{59}L_{22}$, где в нижнем регистре используются значения процентов. Такие формулы целесообразно применять для оценки ландшафтной неоднородности отдельно взятых котловин. При характеристике групп котловин определённой территории (ландшафта, урочища и т. д.) целесообразнее использовать формулы на уровне классификационных групп (рис. 3). Данные формулы описывают более широкие диапазоны рассмотренных ландшафтных характеристик. Котловина $D_{41}/K_{59}L_{22}$ рассматривается как $D_I/K_{II}L_{II}$, являясь слабодренированной, среднезакустаренной и среднезалуженной. Сочетание применённых методов геоинформационного и классификационного анализов ландшафтов показали, что в урочище Пятембой-Гладь преобладают котловины $D_{II}/K_{II}L_{I-II}$.

Данные классификационные формулы, основанные на схеме разделения по степени дренированности и составу растительности, могут использоваться для характеристики ландшафтной дифференциации естественно дренированных термокарстовых озёрных котловин, широко распространённых в Большеземельской тундре [9]. Анализ двух наиболее крупных естественно-дренированных котловин в пределах урочища Пятембой-Гладь показал их сходство как по степени дренированности, так и составу растительности. Дренаж данных котловин произошёл ранее, чем 1960-е гг., в настоящее время они являются умеренно-дренированными, среднезакустаренными и слабозалуженными.

Статистический анализ ландшафтной дифференциации. Анализ отдельных типов ПТК показал, что увеличение площади открытой воды в осушенных котловинах сопровождается пропорциональным возрастанием доли обводнённых хвощевых мочажин ($r=0,8$) (рис. 4, см. цв. вкладку III). Во всех остальных случаях коэффициенты $r \leq 0,6$, поэтому остальные взаимосвязи оценивали на уровне $r \sim \pm 0,5-0,6$. Увеличение площади ивняковых заболоченных тундр сопровождается возрастанием значений NDVI в котловинах ($r=0,6$). Повышение доли осоковых заболоченных луговин сопровождается

снижением спектральных значений индексов NDVI ($r=-0,6$) и MNDWI ($r=-0,5$). Увеличение доли ивняковых тундр сочетается с уменьшением ($r=-0,5$) площади хвощевых мочажин.

На уровне отдельных типов ПТК проведён более подробный анализ спектральных индексов для оценки ландшафтной дифференциации котловин. Усреднённое значение NDVI в искусственно-осушенных котловинах в 2021–2023 гг. составило $0,74 \pm 0,00$. Это выше среднего значения для окружающих (водораздельных) ландшафтов урочища Пятембой-Гладь ($0,69$). Среднее за этот же период значение индекса MNDWI для котловин составило $-0,28 \pm 0,00$, что ниже значения $-0,24$ для окружающих водораздельных озёрно-болотных ландшафтов. Среди рассматриваемых типов ПТК наибольшие средние NDVI отмечены у ивняковых и ерниковых тундр, осоковых луговин с открытой водой, наименьшие – у ПТК с луговой растительностью (рис. 5). По индексу MNDWI минимальные в отрицательном диапазоне значения отмечены для осоковых и вейниково-осоковых луговин, максимальные – для сильно обводнённых растительных сообществ и участков с открытой водой. Кустарниковые (9, 11) сообщества на дренированных участках показывают одновременно высокие значения NDVI при низких MNDWI. Влажные луговины, напротив, характеризуются низкими значениями NDVI и повышенными MNDWI.

Статистический анализ сходства ландшафтных разностей с построением дендрограмм показал, что исследованный массив осушенных котловин по типам ПТК крайне разнороден. На уровне сходства ~ 15 в Евклидовом расстоянии (ed) выделили 2 группы (11 и 8 котловин) (рис. 6). Остальные котловины большей частью схожи с обеими группами на уровне до 20 ed . От общей выборки отличаются котловины №№ 7, 9, 19, 21 (уровень сходства 20–30 ed) и, в особенности, № 18 ($>60 ed$). Первые 4 из данных котловин характеризуются высокой степенью залуженности ($>50\%$), из них две относительно крупные (>90 Га). Этими крупными залуженными котловинами являются бывшие озёра Опытное (№ 7) и Вадты (№ 21), в контурах которых в 1980–1991 гг. производилось регулярное сенокосение [10]. Это очевидно ингибировало активную самовосстановительную сукцессию тундровой кустарниковой растительности. В условиях Крайнего Севера внепойменные луговые агроценозы могут приобретать определённую степень устойчивости, позволяющую системе

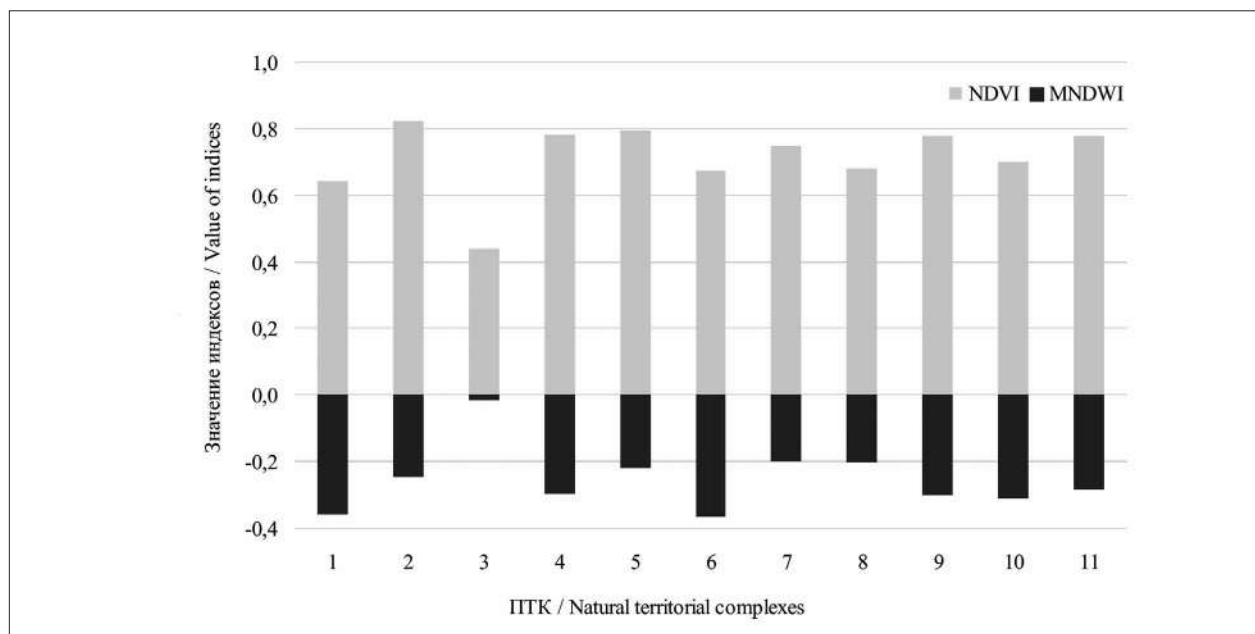


Рис. 5. Средние значения спектральных индексов NDVI и MNDWI выделенных типов ПТК (обозначены цифрами) осушенных озёрных котловин

Fig. 5. Average values of spectral indices NDVI and MNDWI of selected types of natural territorial complexes (indicated by numbers) of drained lake basins

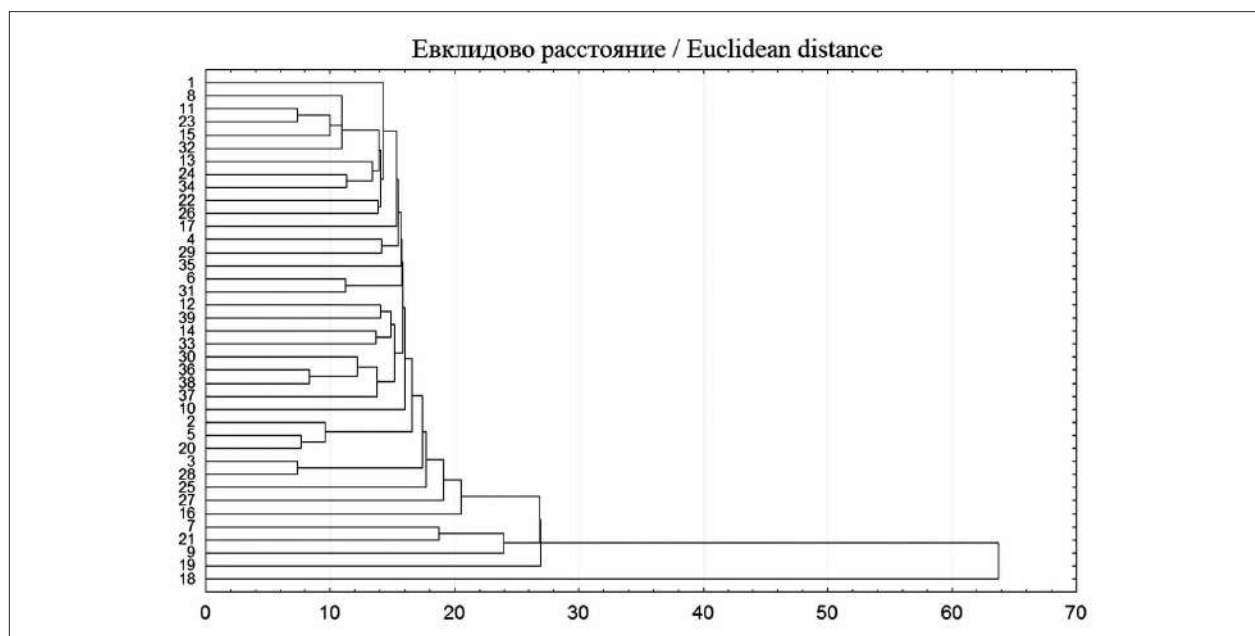


Рис. 6. Дендрограмма сходства осушенных озёрных котловин по структуре ПТК.

Цифрами на вертикальной оси показаны номера котловин

Fig. 6. Dendrogram of similarity of drained lake basins by natural territorial complex structure.

Numbers on the vertical axis show the numbers of lake basins

сопротивляться изменениям [29]. В целом, для большинства исследованных котловин не определена высокая залуженность в связи с длительным (30–40 лет) зарастанием их крупнокустарниковой растительностью. Травянистые сообщества постепенно преобразуются, замещаясь в течение 25–30 лет зональной тундровой растительностью.

Резко отличная от выборки котловина 18 ($D_{11}/K_{20}L_{12}$) характеризуется очень высокой долей моховых мочагин (68%), минимальными значениями MNDWI, а соответственно и максимальной заболоченностью, малым коэффициентом извилистости. Несмотря на отсутствие остаточных озёрков, котловина остаётся максимально заболоченной.

По данным рисунка 6, естественно-дренированные котловины №№ 30, 38 не отличаются от общей выборки искусственно-осушенных аналогов на уровне 10–15 *ед.* Данный уровень сходства подтверждает определённую стабилизацию структуры растительного покрова котловин, искусственно осушенных около 40 лет назад. Структура ПТК в них становится схожей с ландшафтной дифференциацией котловин, дренированных естественным путём более 60 лет назад.

При рассмотрении групп ПТК на основе типов растительности определено, что существуют коррелятивные связи между долей крупнокустарниковых сообществ и индексом NDVI ($r=0,6$). При этом, в слабозакустаренных K_I ПТК среднее значение NDVI составило $0,71 \pm 0,02$, в среднезакустаренных K_{II} $0,74 \pm 0,00$, сильнозакустаренных K_{III} $0,76 \pm 0,00$ (рис. 3). Максимальная (в отрицательном диапазоне) корреляция определена между долей луговой растительности и индексом NDVI ($r=-0,7$). В слабозалуженных L_I ПТК осреднённое значение NDVI составило $0,76 \pm 0,00$, в среднезалуженных L_{II} $0,73 \pm 0,01$, сильнозалуженных L_{III} $0,69 \pm 0,00$. Корреляционная связь прослеживается между долей дренированных ландшафтов и спектральным индексом MNDWI ($r=-0,5$). В анализе групп ПТК по степени дренированности определено, что средние значения индекса MNDWI в дренированных D_{III} ПТК составили $-0,30 \pm 0,00$, для умеренно-дренированных D_{II} $-0,27 \pm 0,00$, слабодренированных D_I $-0,25 \pm 0,03$. Таким образом, использование спектральных индексов показывает свою эффективность при анализе типов ПТК на уровне их групп, дифференцированных как по составу растительного покрова, так и по степени дренированности.

Искусственно-осушенные котловины стали сопоставимы по степени закустаривания и дренированности / заболоченности со «старыми» естественно-осушенными аналогами. В исследуемом урочище Пятембой-Гладь преобладают умеренно-дренированные среднезакустаренные котловины, отражающие стабилизацию структуры ПТК спустя более 40 лет после их осушения. Тем не менее, болотные ландшафты (З+О) занимают более 40% площади всех исследуемых котловин. Это является достаточно высоким показателем, учитывая, что болотные ландшафты на востоке Большеземельской тундры занимают не более 20% [30]. Степень дренированности котловин не коррелирует с их морфометрическими характеристиками, в основном определяясь

рельефом дна и составом почвообразующих пород [16]. Очевидно, что повышенная степень заболоченности сохранится и в дальнейшем ввиду особенностей рельефа, так как котловины – это депрессии с преобладанием гидроморфных условий.

Таким образом, оценка закономерностей ландшафтной дифференциации как на уровне отдельных ПТК, так и их групп, может проводиться с использованием комплекса методов геоинформационного, статистического и классификационного анализа. Апробирование комплекса методов исследований ландшафтов для дренированных котловин выявило возможность его применения и для других территорий Большеземельской тундры, где активны естественные процессы дренирования термокарстовых озёр [9].

Заключение

Комплекс методов геоинформационного, статистического и классификационного анализа позволяет проводить оценку закономерностей ландшафтной дифференциации котловин как на уровне отдельных природно-территориальных комплексов, так и их групп. В современной структуре ландшафтов искусственно-осушенных озёрных котловин юго-востока Большеземельской тундры преобладают ивняковые и ерниковые тундры, менее развиты луговины и мочажины.

Проведена группировка ландшафтных разностей котловин по преобладающему составу растительности и степени дренированности. Для характеристики ландшафтной дифференциации котловин предложена классификационная схема, разделяющая котловины по степени дренированности, закустаренности и залуженности. Данная схема предполагает использование аббревиатурно-цифровых формул: детализированных – для характеристики ландшафтов конкретных котловин и обобщённых – для групп котловин отдельных территорий. Предложенная схема может использоваться для описания ландшафтной дифференциации естественно дренированных озёрных котловин.

Исследуемые котловины классифицируются преимущественно как среднедренированные умеренно-закустаренные. Степени дренированности / заболачивания и закустаривания исследованных искусственно-осушенных котловин стали сопоставимы с показателями «старых» естественно-дренированных аналогов. Ландшафтная дифференциация исследо-

ванных котловин стабилизировалась спустя сорок лет после их дренажа.

Оценки средних значений спектральных индексов сопоставимы с количественными значениями диапазонов предложенных классификационных групп. Группы природно-территориальных комплексов, разделяемые по степени дренированности, отличаются по индексу MNDWI, **различные по закустаренности и залуженности** – по индексу NDVI. Спектральные индексы можно использовать для оценки ландшафтной дифференциации осушенных котловин. Применённые для оценки ландшафтной дифференциации методы могут использоваться для территории Большеземельской тундры, где широко распространены естественно дренированные озёрные котловины.

Исследование выполнено при поддержке темы НИР Института биологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН № 125021902454-1 «Почвы и почвенные ресурсы Европейского Северо-Востока России в условиях современных климатических изменений, антропогенного пресса и социально-экономических вызовов».

Литература

- Grosse G., Jones B.M., Arp C.D. Thermokarst lakes, drainage, and drained basins // Treatise on Geomorphology / Ed. J.F. Shroder. Academic Press, 2013. V. 8. P. 325–353. doi: 10.1016/B978-0-12-374739-6.00216-5
- Olefelt D., Goswami S., Grosse G., Hayes D., Hugelius G., Kuhry P., McGuire A.D., Romanovsky V.E., Sannel A.B.K., Schuur E.A.G., Turetsky M.R. Circumpolar distribution and carbon storage of thermokarst landscapes // Nat. Commun. 2016. V. 7. Article No. 13043. doi: 10.1038/ncomms13043
- Кравцова В.И., Быстрова А.Г. Изменение размеров термокарстовых озёр в различных районах России за последние 30 лет // Криосфера Земли. 2009. Т. 13. № 2. С. 16–26.
- Chen Y., Liu A., Cheng X. Vegetation grows more luxuriantly in Arctic permafrost drained lake basins // Glob. Change Biol. 2021. V. 27. No. 22. P. 5865–5876. doi: 10.1111/gcb.15853
- Nitze I., Grosse G., Jones B.M., Arp C.D., Ulrich M., Fedorov A., Veremeeva A. Landsat-based trend analysis of lake dynamics across Northern permafrost regions // Remote Sens. 2017. V. 9. No. 7. Article No. 640. doi: 10.3390/rs9070640
- Billings W.D., Peterson K.M. Vegetational change and ice-wedge polygons through the thaw-lake cycle in arctic Alaska // Arct. Alp. Res. 1980. V. 12. No. 4. P. 413–432. doi: 10.2307/1550492
- Loiko S., Klimova N., Kuzmina D., Pokrovsky O. Lake drainage in permafrost regions produces variable plant communities of high biomass and productivity // Plants. 2020. V. 9. No. 7. Article No. 867. doi: 10.3390/plants9070867
- Оберман Н.Г., Шеслер И.Г. Современные и прогнозируемые изменения мерзлотных условий европейского Северо-востока Российской Федерации // Проблемы Севера и Арктики Российской Федерации. 2009. № 9. С. 96–106.
- Елсаков В.В., Марущак И.О. Межгодовые изменения термокарстовых озёр Северо-востока европейской России // Исследование Земли из космоса. 2011. № 5. С. 45–57.
- Какунов Н.Б. Климатические изменения и динамика водно-тепловых условий почвогрунтов и растительности в естественном и нарушенном состоянии // Геология разведки. 1980. № 7. С. 134–138.
- Koch J.C., Fondell T.F., Schmutz J.A., Laske S. Nutrient dynamics in partially drained arctic thaw lakes // J. Geophys. Res.: Biogeosci. 2018. V. 123. No. 2. P. 440–452. doi: 10.1002/2017JG004187
- Heijmans M.M.P.D., Magnússon R.Í., Lara M.J., Frost G.V., Myers-Smith I.H., van Huissteden J., Jorgenson M.T., Fedorov A.N., Epstein H.E., Lawrence D.M., Limpens J. Tundra vegetation change and impacts on permafrost // Nat. Rev. Earth Environ. 2022. V. 3. P. 68–84. doi: 10.1038/s43017-021-00233-0
- Lantz T.C. Vegetation succession and environmental conditions following catastrophic lake drainage in Old Crow Flats, Yukon // Arctic. 2017. V. 70. No. 2. P. 177–189. doi: 10.14430/arctic4646
- Kaverin D.A., Melnichuk E.B., Shiklomanov N.I., Kakunov N.B., Pastukhov A.V., Shiklomanov A.N. Long-term changes in the ground thermal regime of an artificially drained thaw-lake basin in the Russian European north // Permafr. Periglac. Process. 2018. V. 29. No. 1. P. 49–59. doi: 10.1002/ppp.1963
- Bockheim J.G., Hinkel K.M., Eisner W.R., Dai X.Y. Carbon pools and accumulation rates in an age-series of soils in drained thaw-lake basins, Arctic Alaska // Soil Sci. Soc. Am. J. 2004. V. 68. No. 2. P. 697–704. doi: 10.2136/sssaj2004.0697
- Jones M.C., Grosse G., Jones B.M., Anthony K.W. Peat accumulation in drained thermokarst lake basins in continuous, ice-rich permafrost, northern Seward Peninsula, Alaska // J. Geophys. Res.: Biogeosci. 2012. V. 117. No. G2. Article No. G00M07. doi: 10.1029/2011jg001766
- Елсаков В.В., Телятников М.Ю. Межгодовые изменения индекса NDVI на территории европейского северо-востока России и западной Сибири в условиях климатических флуктуаций последних десятилетий // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 3. С. 260–271.
- Myers-Smith I.H., Kerby J.T., Phoenix G.K., Bjerke J.W., Epstein H.E., Assmann J.J., John C., Andreu-Hayles L.,

Angers-Blondin S., Beck P.S.A., Berner L.T., Bhatt U.S., Bjorkman A.D., Blok D., Bryn A., Christiansen C.T., Cornelissen J.H.C., Cunliffe A.M., Elmendorf S.C., Forbes B.C., Goetz S.J., Hollister R.D., de Jong R., Lorrant M.M., Macias-Fauria M., Maseyk K., Normand S., Olofsson J., Parker T.C., Parmentier F.-J.W., Post E., Schaepman-Strub G., Stordal F., Sullivan P.F., Thomas H.J.D., Tømmervik H., Treharne R., Tweedie C.E., Walker D.A., Wilmking M., Wipf S. Complexity revealed in the greening of the Arctic // *Nat. Clim. Chang.* 2020. V. 10. P. 106–117. doi: 10.1038/s41558-019-0688-1

19. Berner L.T., Massey R., Jantz P., Forbes B.C., Macias-Fauria M., Myers-Smith I., Kumpula T., Gauthier G., Andreu-Hayles L., Gaglioti B.V., Burns P., Zetterberg P., D'arrigo R., Goetz S.J. Summer warming explains widespread but not uniform greening in the Arctic tundra biome // *Nat. Commun.* 2020. V. 11. Article No. 4621. doi: 10.1038/s41467-020-18479-5

20. Курлович Д.М., Гагина Н.В., Ковалевская О.М. Применение ГИС-технологий при картографировании ландшафтных комплексов особо охраняемых природных территорий Республики Беларусь // *Почвы и земельные ресурсы: современное состояние, проблемы рационального использования, геоинформационное картографирование: материалы междунар. науч.-практ. конф., посвященной 85-летию кафедры почвоведения БГУ и 80-летию со дня рождения д-ра геогр. наук, проф. В.С. Аношко. Минск: БГУ, 2018. С. 182–188.*

21. Голдина Л.П. География озёр Большеземельской тундры. Л.: Наука, 1972. 102 с.

22. Геокриологическая карта СССР, масштаб 1:2,5 млн. / Ред. Е.Д. Ершов, К.А. Кондратьев, В.Ф. Логинов, И.К. Сычев. М.: Гидроспецгеология, 1991. 16 л.

23. Лавриненко И.А. Геоботаническое районирование восточноевропейских тундр как основа сохранения их ресурсов и биоразнообразия // *Биоразнообразие экосистем Крайнего Севера: инвентаризация, мониторинг, охрана: материалы всерос. конф. Сыктывкар: ИБ Коми НЦ УрО РАН, 2013. С. 64–71.*

24. Руофф З.Ф. Типы тундры в районе Воркуты и их связь с многолетнемерзлыми породами // *Тр. сев. отд. Ин-та мерзлотоведения им. В. А. Обручева АН СССР.* 1960. № 1. С. 147–168.

25. Каверин Д.А., Пастухов А.В., Какунов Н.Б., Калмыков А.В. Особенности формирования почв в котловине осушенного озера «Опытное» (европейский северо-восток России) // *Известия СамНЦ РАН.* 2014. Т. 16. № 5. С. 43–50.

26. Sentinel Hub EO Browser [Электронный ресурс] <https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/> (Дата обращения: 24.03.2023).

27. Москалев А.А., Новаковский А.Б. Статистические методы в экологии с использованием R, Statistica, Excel и SPSS. Сыктывкар: Изд-во СыктГУ, 2014. 197 с.

28. Лакин Г.Ф. Биометрия. М.: Высш. шк, 1990. 352 с.

29. Novakovskiy A.B., Panyukov A.N. Analysis of successional dynamics of a sown meadow using Ramenskii–Grime's system of ecological strategies // *Russ. J. Ecol.* 2018. V. 49. No. 2. P. 119–127. doi: 10.1134/S106741361802011X

30. Pastukhov A.V., Kaverin D.A., Shchanov V.M. The creation of digital thematic soil maps at the regional level (with the map of soil carbon pools in the Usa River basin as an example) // *Eurasian Soil Sc.* 2016. V. 49. P. 979–987. doi: 10.1134/S1064229316090106

References

1. Grosse G., Jones B.M., Arp C.D. Thermokarst lakes, drainage, and drained basins // *Treatise on Geomorphology* / Ed. J.F. Shroder. Academic Press, 2013. V. 8. P. 325–353. doi: 10.1016/B978-0-12-374739-6.00216-5

2. Olefeldt D., Goswami S., Grosse G., Hayes D., Hugelius G., Kuhry P., McGuire A.D., Romanovsky V.E., Sannel A.B.K., Schuur E.A.G., Turetsky M.R. Circumpolar distribution and carbon storage of thermokarst landscapes // *Nat. Commun.* 2016. V. 7. Article No. 13043. doi: 10.1038/ncomms13043

3. 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. V. 13. No. 2. P. 16–26 (in Russian).

4. Chen Y., Liu A., Cheng X. Vegetation grows more luxuriantly in Arctic permafrost drained lake basins // *Glob. Change Biol.* 2021. V. 27. No. 22. P. 5865–5876. doi: 10.1111/gcb.15853

5. Nitze I., Grosse G., Jones B.M., Arp C.D., Ulrich M., Fedorov A., Veremeeva A. Landsat-based trend analysis of lake dynamics across Northern permafrost regions // *Remote Sens.* 2017. V. 9. No. 7. Article No. 640. doi:10.3390/rs9070640

6. Billings W.D., Peterson K.M. Vegetational change and ice-wedge polygons through the thaw-lake cycle in arctic Alaska // *Arct. Alp. Res.* 1980. V. 12. No. 4. P. 413–432. doi: 10.2307/1550492

7. Loiko S., Klimova N., Kuzmina D., Pokrovsky O. Lake drainage in permafrost regions produces variable plant communities of high biomass and productivity // *Plants.* 2020. V. 9. No. 7. Article No. 867. doi: 10.3390/plants9070867

8. Oberman N.G., Shesler I.G. Current and projected changes in permafrost conditions in the European North-East of the Russian Federation // *Problems of the North and Arctic of the Russian Federation.* 2009. No. 9. P. 96–106 (in Russian).

9. Elsakov V.V., Maruschak I.O. The inter-year changes of thermokarst lakes on North-East part of European Russia // *Issledovanie Zemli iz Kosmosa.* 2011. No. 5. P. 45–57 (in Russian).

10. Kakunov N.B. Climate changes and dynamics of water-thermal conditions of soils and vegetation in natural

- and disturbed states // *Geologiya razvedki*. 1980. No. 7. P. 134–138 (in Russian).
11. Koch J.C., Fondell T.F., Laske S., Schmutz J.A. Nutrient dynamics in partially drained arctic thaw lakes // *J. Geophys. Res.: Biogeosci.* 2018. V. 123. No. 2. P. 440–452. doi:10.1002/2017JG004187
12. Heijmans M.M.P.D., Magnússon R.Í., Lara M.J., Frost G.V., Myers-Smith I.H., van Huissteden J., Jorgenson M.T., Fedorov A.N., Epstein H.E., Lawrence D.M., Limpens J. Tundra vegetation change and impacts on permafrost // *Nat. Rev. Earth Environ.* 2022. V. 3. P. 68–84. doi: 10.1038/s43017-021-00233-0
13. Lantz T.C. Vegetation succession and environmental conditions following catastrophic lake drainage in Old Crow Flats, Yukon // *Arctic*. 2017. V. 70. No. 2. P. 177–189. doi: 10.14430/arctic4646
14. Kaverin D.A., Melnichuk E.B., Shiklomanov N.I., Kakunov N.B., Pastukhov A.V., Shiklomanov A.N. Long-term changes in the ground thermal regime of an artificially drained thaw-lake basin in the Russian European north // *Permafr. Periglac. Process.* 2018. V. 29. No. 1. P. 49–59. doi: 10.1002/ppp.1963
15. Bockheim J.G., Hinkel K.M., Eisner W.R., Dai X.Y. Carbon pools and accumulation rates in an age-series of soils in drained thaw-lake basins, Arctic Alaska // *Soil Sci. Soc. Am. J.* 2004. V. 68. No. 2. P. 697–704. doi: 10.2136/sssaj2004.0697
16. Jones M.C., Grosse G., Jones B.M., Anthony K.W. Peat accumulation in drained thermokarst lake basins in continuous, ice-rich permafrost, northern Seward Peninsula, Alaska // *J. Geophys. Res.: Biogeosci.* 2012. V. 117. No. G2. Article No. G00M07. doi: 10.1029/2011jg001766
17. Elsakov V.V., Telyatnikov M.Yu. Effects of inter-annual climatic fluctuations of the last decade on NDVI in north-eastern European Russia and Western Siberia // *Current problems in remote sensing of the Earth from space*. 2013. V. 10. No. 3. P. 260–271 (in Russian).
18. Myers-Smith I.H., Kerby J.T., Phoenix G.K., Bjerke J.W., Epstein H.E., Assmann J.J., John C., Andreu-Hayles L., Angers-Blondin S., Beck P.S.A., Berner L.T., Bhatt U.S., Bjorkman A.D., Blok D., Bryn A., Christiansen C.T., Cornelissen J.H.C., Cunliffe A.M., Elmendorf S.C., Forbes B.C., Goetz S.J., Hollister R.D., de Jong R., Lorrant M.M., Macias-Fauria M., Maseyk K., Normand S., Olofsson J., Parker T.C., Parmentier F.-J.W., Post E., Schaepman-Strub G., Stordal F., Sullivan P.F., Thomas H.J.D., Tømmervik H., Treharne R., Tweedie C.E., Walker D.A., Wilmsking M., Wipf S. Complexity revealed in the greening of the Arctic // *Nat. Clim. Chang.* 2020. V. 10. P. 106–117. doi: 10.1038/s41558-019-0688-1
19. Berner L.T., Massey R., Jantz P., Forbes B.C., Macias-Fauria M., Myers-Smith I., Kumpula T., Gauthier G., Andreu-Hayles L., Gaglioti B.V., Burns P., Zetterberg P., D'arrigo R., Goetz S.J. Summer warming explains widespread but not uniform greening in the Arctic tundra biome // *Nat. Commun.* 2020. V. 11. Article No. 4621. doi: 10.1038/s41467-020-18479-5
20. Kurlovich D.M., Gagina N.V., Kovalevskaya O.M. GIS technologies application in mapping landscape complexes of specially protected natural areas of the Republic of Belarus // *Soils and land resources: current state, problems of rational use, geoinformation mapping: materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 85-letiyu kafedry pochvovedeniya BGU i 80-letiyu so dnya rozhdeniya V.S. Anoshko*. Minsk: BSU, 2018. P. 182–188 (in Russian).
21. Goldina L.P. Geography of lakes in the Bolshezemel'skaya tundra. Leningrad: Nauka, 1972. 102 p. (in Russian).
22. USSR geocryological map, scale 1:2.5 million / Eds. E.D. Ershov, K.A. Kondratiev, V.F. Loginov, I.K. Sychev. Moskva: Gidrospetsgeologiya, 1991. 16 p. (in Russian).
23. Lavrinenko I.A. Geobotanical zoning of East European tundra as a basis for preserving their resources and biodiversity // *Biodiversity of ecosystems of the Far North: inventory, monitoring, protection: materialy vserossiyskoy konferentsii*. Syktyvkar: IB Komi NTs UrO RAN, 2013. P. 64–71 (in Russian).
24. Ruoff Z.F. Tundra types in the Vorkuta region and their connection with permafrost // *Proceedings of the Northern Branch of the V.A. Obruchev Permafrost Institute*. 1960. No. 1. P. 147–168 (in Russian).
25. Kaverin D.A., Pastukhov A.V., Kakunov N.B., Kalmykov A.V. Features of soil genesis in the basin of drained lake “Opytnoye” (European northeast of Russia) // *Izvestia RAS SamSC*. 2014. V. 16. No. 5. P. 43–50 (in Russian).
26. Sentinel Hub EO Browser [Internet resource] <https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/> (Accessed: 24.03.2023).
27. Moskal'yev A.A., Novakovskiy A.B. Statistical methods in ecology using R, Statistica, Excel and SPSS. Syktyvkar: Syktyvkar State University, 2014. 197 p. (in Russian).
28. Lakin G.F. Biometrics. Moskva: Vysshaya shkola, 1990. 352 p. (in Russian).
29. Novakovskiy A.B., Panyukov A.N. Analysis of successional dynamics of a sown meadow using Ramenskii–Grime's system of ecological strategies // *Russ. J. Ecol.* 2018. V. 49. No. 2. P. 119–127. doi: 10.1134/S106741361802011X
30. Pastukhov A.V., Kaverin D.A., Shchanov V.M. The creation of digital thematic soil maps at the regional level (with the map of soil carbon pools in the Usa River basin as an example) // *Eurasian Soil Sc.* 2016. V. 49. P. 979–987. doi: 10.1134/S1064229316090106