
ЛАНДШАФТЫ И ЭКОСИСТЕМЫ В УСЛОВИЯХ
МЕНЯЮЩЕГОСЯ КЛИМАТА

УДК 551.34:528.88

**РАЗВИТИЕ МОРФОЛОГИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ЛАНДШАФТОВ
КРИОЛИТОЗОНЫ В СВЯЗИ С КЛИМАТИЧЕСКИМИ ИЗМЕНЕНИЯМИ:
ИССЛЕДОВАНИЕ НА ОСНОВЕ ВЕРОЯТНОСТНОГО ПОДХОДА**

© 2024 г. А. С. Викторов¹, *, М. В. Архипова¹, В. Н. Капралова¹,
Т. В. Орлов¹, О. Н. Трапезникова¹

¹Институт геоэкологии им. Е. М. Сергеева Российской академии наук, Москва, Россия

*e-mail: vic_as@mail.ru

Поступила в редакцию 15.05.2023 г.

После доработки 02.04.2024 г.

Принята к публикации 16.05.2024 г.

Целью настоящего исследования явилась оценка характера эволюции морфологической структуры наиболее распространенных условно-коренных ландшафтов криолитозоны (озерно-термокарстовых равнин, эрозионно-термокарстовых равнин, пойменных равнин) в связи с климатическими изменениями на основе вероятностных подходов. В процессе исследования были выбраны 28 участков, находящихся в разных физико-географических условиях, в частности, сложенных разнообразными отложениями — дельтовыми, озерно-аллювиальными, аллювиальными и аллювиально-морскими, флювиогляциальными отложениями, а также озерно-болотными образованиями. По материалам космической съемки высокого разрешения были получены выборки количественных характеристик морфологических структур рассматриваемых ландшафтов (площадей термокарстовых озер для термокарстовых равнин и длин стрел формирующихся фрагментов для пойменных ландшафтов) за два срока съемки с интервалом 40–55 лет; выборки по каждому участку сравнивались по критерию Смирнова. В итоге сделан вывод, что вероятностный анализ изменений количественных характеристик морфологических структур типичных ландшафтов криолитозоны за 40–55-летний интервал свидетельствует об ограниченном характере изменений. В то же время для ряда участков наблюдаются статистически подтвержденная эволюция морфологических структур, при этом изменения развиваются в основном в пределах термокарстовых равнин, а в пределах пойменных ландшафтов на рассматриваемом временном интервале практически не фиксируются. Изменения морфологической структуры в пределах эрозионно-термокарстовых равнин протекают несколько более интенсивно, чем в пределах озерно-термокарстовых равнин, что может быть объяснено более активной реакцией на климатические изменения термоэрозийных процессов по сравнению с термокарстовыми. Наблюдаемые изменения морфологической структуры приурочены к западной части Западной Сибири, однако при этом показывают дифференцированность по ландшафтам даже в случае близкого расположения, это указывает на важную роль состава отложений и геокриологических условий.

Ключевые слова: рисунок ландшафта, математическая морфология ландшафтов, равнины криолитозоны, климатические изменения, отклик на изменения климата, термокарст, дистанционное зондирование

DOI: 10.31857/S2587556624030034 EDN: SOVOPJ

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Исследованиям того как климатические изменения влияют на ландшафтные условия криолитозоны были посвящены работы широкого ряда авторов, например, (Котляков и др., 2015; Morgenstern et al., 2021; Nicolsky et al., 2017; и др.), однако, как показывает анализ, в большей части исследований рассматривались изменения отдельных компонентов ландшафта или их сочетаний.

Одним из индикаторов изменений ландшафтов криолитозоны являются термокарстовые озера. Доступ к данным дистанционного зондирования и средствам их обработки предоставил возможность исследовать протяженные площади криолитозоны, в целом труднодоступной для прямых исследований. При этом в случае, например, озерно-термокарстовых и эрозионно-термокарстовых равнин работы касались преимущественно изучения изменения заозе-

ренности, динамики размеров озер и поиска связи с геоэкологическими и климатическими условиями конкретного региона (Кравцова, Родионова, 2016; Grosse et al., 2008; Nitze et al., 2017; Olefeldt et al., 2016; Pekel et al., 2016). Подобные работы выявили существенную изменчивость размеров и площадей озер, которая нередко носила разнонаправленный характер даже в пределах одного ландшафта (Капралова, 2014; Karjalova et al., 2019). Такая ситуация накладывалась на общие изменения ансамблей озер и ставила вопрос о реальности (значимости) зафиксированных изменений.

Динамика пойменных ландшафтов, в том числе в пределах криолитозоны, исследовалась во многих публикациях (Попов, 2012; Чалов, 1979; Joung, 1970; Lotsari et al., 2019; Peschke, 1973; Sylvester et al., 2019), при этом значительная часть работ посвящена рельефу пойменных равнин (Панин и др., 2011; Чалов, Чернов, 1985; Nanson and Croke, 1992). Однако вопросам оценки изменения морфологических структур в целом и оценке степени случайности выявленных различий уделялось сравнительно мало внимания.

Таким образом, рассмотрение литературы показывает, что, несмотря на большое число выполненных исследований, современное состояние изученности проблемы характеризуется следующими особенностями:

- значительным вниманием, уделяемым изменению отдельных компонентов и комплексов, и гораздо меньшим — уделяемым морфологической структуре ландшафтов, прежде всего их количественным характеристикам;
- незначительным количеством оценок статистической значимости выявляемых временных изменений, т.е. по сути степени случайности наблюдаемых изменений.

Целью настоящего исследования явилась оценка особенностей эволюции морфологической структуры наиболее распространенных ландшафтов криолитозоны в связи с климатическими изменениями на основе вероятностных подходов.

Исследование выполнено на базе трех наиболее распространенных ландшафтов криолитозоны: озерно-термокарстовых равнин, эрозионно-термокарстовых равнин, пойменных равнин.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Озерно-термокарстовые равнины представляют собой сочетание выравненных или пологоволнистых поверхностей с тундровой или лесотундровой растительностью на тундровых глеевых почвах и многочисленных термокарстовых озер (рис. 1а). Озера имеют, как правило, округлую или фестончатую форму и в беспорядке расположены в ландшафте. Основным про-

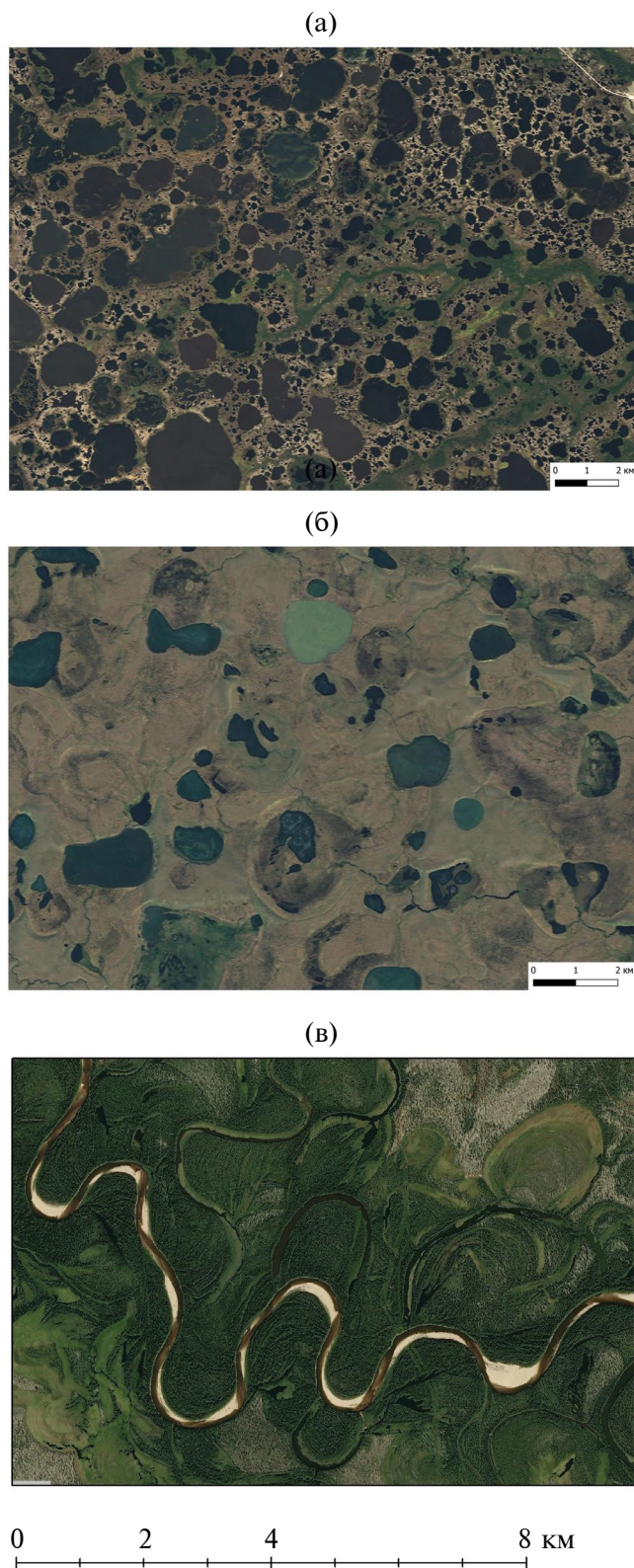


Рис. 1. Типичные изображения на материалах космической съемки: (а) озерно-термокарстовой равнины, (б) эрозионно-термокарстовой равнины, (в) грядистой пойменной равнины.

цессом является изменение площади озер за счет развития термоабразии. Возможным процессом является также появление новых озер, однако выполненные исследования показывают, что

количественные особенности морфологической структуры, точнее характер вероятностного распределения площадей озер, противоречит этой гипотезе (Викторов и др., 2015).

Эрозионно-термокарстовыми равнинами в рамках настоящей статьи называются ландшафты, представляющие собой выравненные или пологоволнистые поверхности с тундровой или лесотундровой растительностью на тундровых глеевых почвах с вкраплением многочисленных термокарстовых озер и хасыреев¹, а также эрозионных форм (рис. 1б). Озера и хасыреи имеют, как правило, округлую или фестончатую форму и в беспорядке расположены в ландшафте. Основными процессами являются изменение озер за счет термоабразионных процессов, спуск озер термоэрозионными процессами с превращением в хасыреи и появление новых озер, в особенности в пределах возникающих хасыреев.

Ландшафты гривистых пойменных равнин представляют собой сочетание грив с лесной и лесотундровой растительностью на аллювиальных почвах и межгривных понижений с более гидроморфными природными комплексами (рис. 1в). Гривы и межгривные понижения имеют форму согласованных по форме и направлению дуг, формирующих сегменты; сегменты в беспорядке прилегают друг к другу с угловым несогласием, часто стирая части друг друга, таким образом образуется ландшафтный рисунок пойменных равнин. Основными процессами изменения ландшафта является меандрирование русла; в процессе меандрирования происходит изгибание и последующее спрямление излучин со стиранием существующих сегментов и генерацией новых. Пойменный сегмент, замыкающийся руслом, является наиболее молодым, находящимся в процессе формирования, он еще не подвергался стиранию. Таким образом, в пределах пойменной равнины наблюдается комплекс разновозрастных, разнесенных во времени фрагментов пойменных сегментов.

Методика исследований включала следующие основные этапы:

- выбор ключевых участков и получение материалов дистанционных съемок;
- выделение необходимых для расчетов количественных характеристик элементов морфологической структуры на основе использования геоинформационной системы в виде векторного объекта;
- сравнение эмпирических распределений выбранных количественных характеристик морфологической структуры за два срока для каждо-

го участка на основе статистического критерия Смирнова;

- анализ полученных данных сравнения.

При анализе изменения морфологических структур озерно-термокарстовых и эрозионно-термокарстовых равнин использовались площади термокарстовых озер. Выделение термокарстовых озер и определение их площади производилось с помощью геоинформационной системы ArcGIS как автоматизированным, так и ручным методом. При этом использовались известные дешифровочные признаки термокарстовых озер, ставшие традиционными при проведении инженерно-геологической съемки (Методическое ..., 1978).

При анализе изменения морфологических структур пойменных равнин использовались стрелы молодых (т.е. формирующихся в настоящее время и ограничивающихся руслом) пойменных сегментов; стрелой сегмента по аналогии со стрелкой дуги в статье называется размер сегмента в направлении, перпендикулярном хорде его основания.

При исследовании был использован следующий комплекс материалов космической съемки:

- архивные снимки Согопа за июнь–август 1965–1976 гг. с разрешением 3–12 м/пикс.;
- современные снимки в основном за июнь–август 2011–2019 гг. со спутников IKONOS, QuickBird, WorldView 2, GeoEye-1, Pleiades, SPOT-5, SPOT-6 с разрешением 0.5–2.5 м/пикс. При использовании космических снимков производилось перепроецирование снимков Согопа с привязкой по опознаваемым точкам без ортотрансформирования, поскольку осуществлялось сравнение не отдельных морфологических элементов за первый и второй срок, а их ансамблей, что учитывает случайные вариации параметров.

Выбор ключевых участков производился с соблюдением следующих требований:

- внутренняя однородность морфологической структуры и геолого-геоморфологических и геоэкологических условий;
- охват разнообразия физико-географических условий;
- наличие материалов повторной космической съемки высокого разрешения со значительным временным интервалом между сроками съемки.

Для пойменных равнин участки выбирались, кроме того, с соблюдением требования свободного меандрирования.

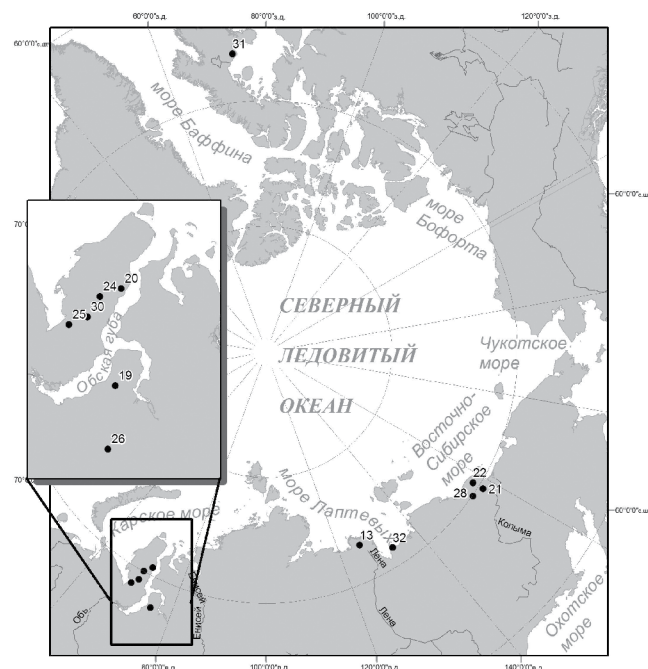
Для проведения исследований выбраны 28 участков, разных в геоморфологическом, геоэкологическом и физико-географическом отношении и расположенных в различных регионах – Печорская низменность, полуостров Ямал, Западно-Сибирская равнина, Северо-Сибир-

¹ Хасыреем (то же – алас) называют озерную котловину с лугово-болотной растительностью, возникающую при спуске термокарстового озера из-за деятельности термоэрозионных процессов.

(a)



(б)



(в)

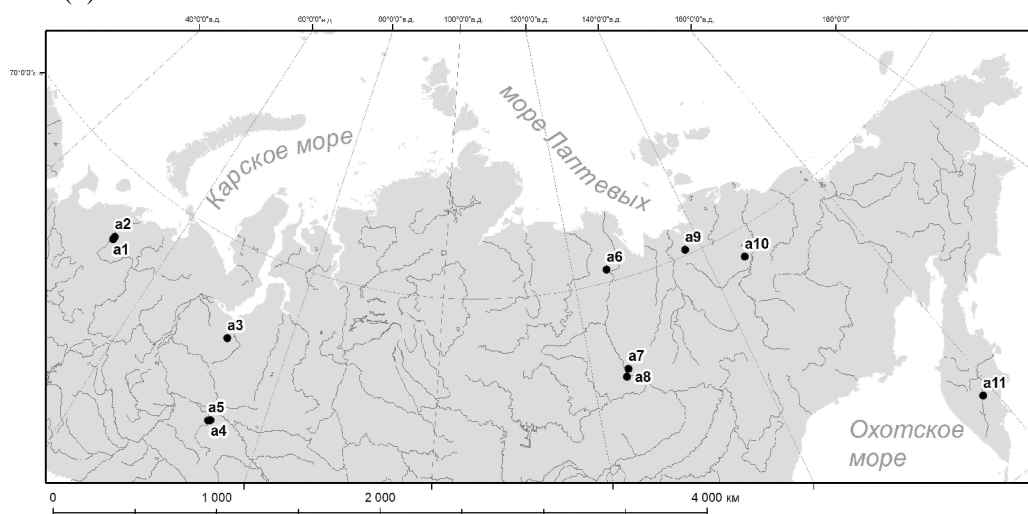


Рис. 2. Схема расположения ключевых участков: (а) озерно-термокарстовых равнин, (б) эрозионно-термокарстовых равнин, (в) пойменных равнин.

ская низменность, дельта р. Лены, Колымская низменность, Центрально-Якутская равнина, Центрально-Камчатская низменность, Арктическая низменность (Аляска). Площадь одного участка составляла в основном 200–1200 км². Участки, по данным государственной геологической съемки, сложены разнообразными отложениями — песчаными дельтовыми отложениями; озерно-аллювиальными горизонтально слоистыми алевритами, переслаивающимися с песками и торфами, а также суглинками и супесями, аллювиальными и аллювиально-морскими отложениями (суглинками, супесями и песками), флювиогляциальными песками и валунными суглинками, морскими отложениями, представ-

ленными пылеватými песками, песчаными, супесчаными и суглинистыми отложениями, озерно-болотными образованиями. Для возвышенных участков характерно сплошное распространение многолетнемерзлых пород. Расположение участков представлено на рис. 2.

В процессе статистической обработки строились эмпирические распределения соответствующих количественных характеристик за каждый срок съемки и проводилось сравнение эмпирических распределений по каждому участку за первый срок и за второй срок с использованием критерия Смирнова. Использование данного критерия свободно от предположений о справедливости какой-либо математической модели

Таблица 1. Сопоставление распределения площадей озер озерно-термокарстовых, эрозионно-термокарстовых равнин за два срока, сопоставление длин стрел формирующихся сегментов за два срока

Участок	Объем выборки		Значение критерия Смирнова	p^*
	срок 1	срок 2		
Озерно-термокарстовые равнины				
as3	180	176	0.152	$p < 0.05$
as10	167	167	0.036	$p > 0.10$
as14	153	154	0.048	$p > 0.10$
as16	584	576	0.031	$p > 0.10$
as19	209	209	0.038	$p > 0.10$
as21	351	345	0.024	$p > 0.10$
as23	109	108	0.048	$p > 0.10$
as31	207	210	0.028	$p > 0.10$
Эрозионно-термокарстовые равнины				
20	359	372	0.150	$p < 0.001$
21	430	433	0.040	$p > 0.10$
24	381	362	0.100	$p < 0.05$
25	314	309	0.073	$p > 0.10$
19	205	205	0.078	$p > 0.10$
22	291	298	0.056	$p > 0.10$
30	524	522	0.043	$p > 0.10$
31	100	95	0.040	$p > 0.10$
40	553	549	0.043	$p > 0.10$
Пойменные равнины				
a1 (р. Шапкина)	53	53	0.121	$p > 0.10$
a2 (р. Сэдзэва)	53	50	0.081	$p > 0.10$
a3 (р. Хейгияха)	56	56	0.102	$p > 0.10$
a4 (р. Юган)	51	52	0.087	$p > 0.10$
a5 (р. Малый Юган)	57	61	0.075	$p > 0.10$
a6 (р. Буор-Эекит)	57	54	0.119	$p > 0.10$
a7 (р. Кондюдей)	68	68	0.070	$p > 0.10$
a8 (р. Линде)	55	55	0.112	$p > 0.10$
a9 (р. Чондон)	57	52	0.109	$p > 0.10$
a10 (р. Уяндина)	56	53	0.109	$p > 0.10$
a11 (р. Камчатка)	57	58	0.230	$p > 0.10$

Примечание: *для статистически значимого различия двух выборок на уровне 0.95 должно быть $p < 0.05$, подобные случаи выделены жирным шрифтом.

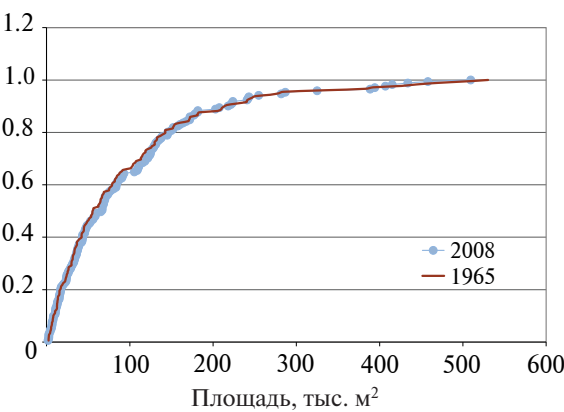


Рис. 3. Пример сопоставления графиков эмпирических распределений для участка озерно-термокарстовых равнин (участок 19).

морфологической структуры участка и не зависит от подчинения распределений какому-либо теоретическому распределению.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В целом данные по изменениям морфологической структуры рассматриваемых типичных ландшафтов криолитозоны получены на 28 участках – 8 в пределах озерно-термокарстовых равнин, 9 в пределах эрозионно-термокарстовых равнин и 11 в пределах пойменных равнин; при этом объемы выборок составили от 50 до 584 элементов (табл. 1²). Участки a4 и a5 включены в ключевые участки типичных ландшафтов криолитозоны, так как на геокриологической карте РФ масштаба 1 : 2500000 в этой области указано распространение перелетков мерзлых пород и возможно островов мерзлых пород.

В итоге проведенных исследований в пределах озерно-термокарстовых равнин получено, что на семи из восьми участков разница распределений не выходит за пределы случайных отличий при уровне значимости 0.95. Пример сопоставления графиков распределений приведен на рис. 3. Статистически значимые отличия зафиксированы только на одном участке из восьми при объемах выборок 109–584.

Сопоставление распределений площадей термокарстовых озер в пределах эрозионно-термокарстовых равнин выявило, что на 7 участках из 9 наблюдаются незначимые различия на уровне 0.95. Пример сопоставления графиков распределений приведен на рис. 4. Статистически значимые отличия распределений отмечаются только на двух участках (участки 20 и 24) при объемах выборок 95–553.

² При составлении части таблицы также использованы ранее опубликованные авторами данные (Викторов и др., 2023).

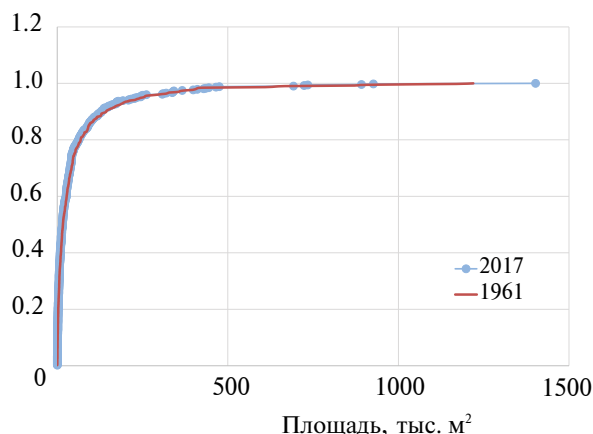


Рис. 4. Пример сопоставления графиков эмпирических распределений для участка эрозионно-термокарстовых равнин (участок 30).

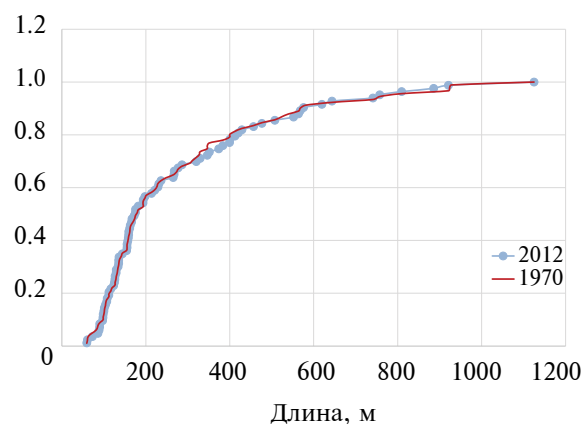


Рис. 5. Пример сопоставления графиков эмпирических распределений длин стрел формирующихся сегментов для участка пойменных равнин (участок а4).

В пределах пойменных равнин проведенное сопоставление показало, что статистически значимые отличия на уровне 0.95 отсутствуют на всех участках, при этом объемы выборок колеблются от 50 до 68 элементов. Пример сопоставления графиков распределений приведен на рис. 5.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ полученной совокупности данных позволяет наметить выводы по оценке изменения морфологической структуры наиболее типичных ландшафтов криолитозоны. Проведенное сопоставление по всей совокупности участков в целом позволяет утверждать, что на анализируемых временных интервалах (40–55 лет) в основном не наблюдается существенных изменений эмпирических распределений анализируемых параметров. Статистически значимые изменения, которые на уровне значимости 0.95 нельзя считать случайными, отмечаются в целом только на 3 участках из 28. При этом участки имеют различное географическое положение и значительную разницу в физико-географических условиях.

В пределах озерно-термокарстовых равнин статистически значимые изменения наблюдаются только на одном участке as3 (12% от числа участков). Участок расположен в восточной части полуострова Ямал. Подчеркнем, что на расположенном на том же полуострове недалеко и чуть южнее другом участке (as31) подобные изменения уже не фиксируются.

На территории развития эрозионно-термокарстовых равнин значимые различия наблюдаются на 2 участках из 9 (участки 20 и 24—22% от числа участков). Оба участка также расположены на полуострове Ямал, на других участках, расположенных в устье р. Лены, в пределах Колымской низменности и на Баффиновой Земле

отличия не выходят за пределы случайных на уровне значимости 0.95. Таким образом, территорией, на которой концентрируются выявленные изменения и для озерно-термокарстовых равнин, и для эрозионно-термокарстовых равнин оказывается Западная Сибирь — полуостров Ямал. Этот вывод безусловно является предварительным, его достоверность ограничена числом и расположением участков.

Полученный материал позволяет также сделать вывод, что изменения морфологической структуры в пределах эрозионно-термокарстовых равнин протекают несколько более интенсивно, чем в пределах озерно-термокарстовых равнин, это отражается в несколько большей доле участков с отмеченными изменениями морфологической структуры (22% против 12%). Возможным объяснением этой тенденции может быть то, что термоэрозионные процессы более активно реагируют на климатические изменения, чем термокарстовые и термоабразионные. В силу этого активизация термоэрозионных процессов, широко распространенных в ландшафтах эрозионно-термокарстовых равнин, может иметь следствием ускорение процесса спуска термокарстовых озер с превращением их в хасыреи и, соответственно, изменение распределений площадей термокарстовых озер.

Отсутствие статистически значимых изменений анализируемого параметра на участках ландшафта пойм может быть объяснено значительно меньшим распространением в их пределах многолетнемерзлых пород. Соответственно, значительно меньшей является возможность их деградации при климатических изменениях и влияния на русловые процессы, а значит, и на распределение анализируемого параметра (длин стрел). Конечно, из этого нельзя сделать вывод, что климатические изменения не влияют на морфологическую структуру пойменных ландшафтов, однако механизм их влияния существенно

другой (например, через изменение водности) и, возможно, имеет большее запаздывание, чем анализируемые временные интервалы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вероятностный анализ изменений за интервал 40–55 лет количественных характеристик морфологических структур типичных ландшафтов криолитозоны (площадей термокарстовых озер для термокарстовых равнин и длин стрел формирующихся фрагментов для пойменных ландшафтов) заставляет сделать вывод об ограниченном характере изменений. В то же время для ряда участков наблюдается статистически подтвержденная эволюция морфологических структур, при этом изменения развиваются в основном в пределах термокарстовых равнин, а в пределах пойменных ландшафтов на рассматриваемом временном интервале практически не фиксируются.

Изменения морфологической структуры в пределах эрозионно-термокарстовых равнин протекают несколько более интенсивно, чем в пределах озерно-термокарстовых равнин, что может быть объяснено более активной реакцией на климатические изменения термоэрозионных процессов по сравнению с термокарстовыми.

Наблюдаемые изменения морфологической структуры приурочены к западной части Западной Сибири, однако при этом показывают дифференцированность по ландшафтам даже в случае близкого расположения, как например, показали исследования двух рядом расположенных участков озерно-термокарстовых равнин, это указывает на важную роль состава отложений и геокриологических условий.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено в рамках Государственного задания Института геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН № FMWM-2022-0010.

FUNDING

The study was carried out within the framework of the State Assignment of the Sergeev Institute of Environmental Geoscience of the Russian Academy of Sciences № FMWM-2022-0010.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Викторов А.С., Капралова В.Н., Орлов Т.В., Трапезникова О.Н., Архипова М.В., Березин П.В., Зверев А.В., Панченко Е.Н., Садков С.А. Анализ развития морфологической структуры озерно-термокарстовых равнин на основе математической модели // Геоморфология. 2015. № 3. С. 3–13.
<https://doi.org/10.15356/0435-4281-2015-3>
- Викторов А.С., Архипова М.В., Капралова В.Н., Орлов Т.В., Трапезникова О.Н. Оценка эволюции развития морфологической структуры термокарстовых равнин криолитозоны в связи с климатическими изменениями по материалам космической съемки // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. М.: Наука, 2023. № 2. С. 76–86.
<https://doi.org/10.31857/S0869780923020091>
- Капралова В.Н. Закономерности развития термокарстовых процессов в пределах озерно-термокарстовых равнин (на основе подходов математической морфологии ландшафта). Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. М.: ИГЭ РАН, 2014. 24 с.
- Котляков В.М., Величко А.А., Глазовский А.Ф., Тумской В.Е. Прошлое и современность криосферы Арктики // Вестн. РАН. М.: МАИК "Наука/Интерпериодика", 2015. Т. 85. № 5–6. С. 463–471.
- Кравцова В.И., Родионова Т.В. Исследование динамики площади и количества термокарстовых озер в различных районах криолитозоны России по космическим снимкам // Криосфера Земли. 2016. Т. 20. № 1. С. 81–89.
- Методическое руководство по инженерно-геологической съемке масштаба 1 : 200000 (1 : 100000–1 : 500000). М.: ВСЕГИНГЕО, Недра, 1978. 391 с.
- Панин А., Сидорчук А., Чернов А. Основные этапы формирования пойм равнинных рек Северной Евразии // Геоморфология. 2011. № 3. С. 20–31.
- Полищук В.Ю., Полищук Ю.М. Геоимитационное моделирование полей термокарстовых озер в зонах мерзлоты. Мин-во образования и науки Российской Федерации, ФГБОУ ВПО "Югорский гос. ун-т", Ин-т мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Ин-т химии нефти СО РАН. Ханты-Мансийск: УИП ЮГУ, 2013. 128 с.
- Попов И.В. Методологические основы гидроморфологической теории руслового процесса: Изб. тр. СПб.: Нестор-История, 2012. 304 с.
- Трифонов Т.А. Методика морфометрической характеристики типов и подтипов поймы реки Оби на основе дешифрирования аэрофотоснимков // Вестн. Моск. ун-та. Серия Биология, почвоведение. 1975. № 5. С. 15–26.
- Чалов Р.С. Географические исследования русловых процессов. М.: Изд-во МГУ, 1979. 232 с.
- Чалов Р.С., Чернов А.В. Геоморфологическая классификация пойм равнинных рек // Геоморфология. 1985. № 3. С. 3–11.
- Grosse G., Romanovsky V., Walter K., Morgenstern A., Lantuit H., Zimov S. Distribution of thermokarst lakes and ponds at three yedoma sites in Siberia // Ninth international conference on permafrost. Univ. of Alaska Fairbanks, 2008. Vol. 1. P. 551–556.
- Joung R.W. The patterns of some meandering valleys in New South Wales // Austral. Geogr. 1970. Vol. 11. № 3. P. 269–277.

- Kapralova V.N., Chesnokova I.V., Makarycheva E.M., Sergeev D.O. Importance of the Variability of Geocryological Conditions in the Determination of the Significance of the Lakes in the Structure of Regional Water Discharge // *Water Res.* 2019. Vol. 46. Suppl. 2. P. S81–S86.
- Lotsari E., Hackney C., Salmela J., Kasvi E., Kemp J., Alho P., Darby S.E. Sub-arctic river bank dynamics and driving processes during the open-channel flow period // *Earth Surface Processes and Landforms.* 2019. Vol. 45. № 5.
<https://doi.org/10.1002/esp.4796>
- Morgenstern A., Overduin P.P., Gnther F., Stettner S., Ramage J., Schirrmeister L., Grigoriev M.N., Grosse G. Thermo-erosional valleys in Siberian ice-rich permafrost // *Permafrost and Periglac Process.* 2021. Vol. 32. № 1. P. 59–75.
<https://doi.org/10.1002/ppp.2087>
- Muster S., Riley W.J., Roth K., Langer M., Cresto Aleina F., Koven Ch.D., Lange S., Bartsch A., Grosse G., Wilson C.J., Jones B.M., Boike J. Size distributions of Arctic waterbodies reveal consistent relations in their statistical moments in space and time // *Frontiers in Earth Science.* 2019. Vol. 7. Art. 5.
<https://doi.org/10.3389/feart.2019.00005>
- Muster S., Roth K., Langer M., Lange S., Cresto Aleina F., Bartsch A., Morgenstern A., Grosse G., Jones B., Sannel A.B.K., Sjöberg Y., Günther F., Andresen C., Veremeeva A., Lindgren P.R., Bouchard F., Lara M.J., Fortier D., Charbonneau S., Virtanen T.A., Hugelius G., Palmtag J., Siewert M.B., Riley W.J., Koven C.D., Boike J. PerL: a circum-Arctic Permafrost Region Pond and Lake database // *Earth System Science Data.* 2017. Vol. 9. P. 317–348.
<https://doi.org/10.5194/essd-9-317-2017>
- Nanson G.C., Croke J.C. A genetic classification of floodplains. *Floodplain Evolution // Geomorphology.* 1992. Vol. 4. № 6. P. 460–486.
- Nicolsky D.J., Romanovsky V.E., Panda S.K., Marchenko S.S., Muskett R.R. Applicability of the ecosystem type approach to model permafrost dynamics across the Alaska North Slope // *Geophys. Res. Earth Surf.* 2017. Vol. 122. P. 50–75.
<https://doi.org/10.1002/2016JF003852>
- 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. Vol. 9. № 7. 640 p.
<https://doi.org/10.3390/rs9070640>
- Olefelt D., Goswami S., Grosse G., Hayes D.J., Hugelius G., Kuhry P., Sannel B., Schuur E.A.G., Turetsky M.R. Arctic Circumpolar Distribution and Soil Carbon of Thermokarst Landscapes // *Nature.* 2016. Vol. 7. P. 1–11.
<https://doi.org/10.1038/ncomms13043>
- Pekel J.-F., Cottam A., Gorelick N., Belward A. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes // *Nature.* 2016. Vol. 540. P. 418–422.
<https://doi.org/10.1038/nature20584>
- Peschke G. Zur Anwendbarkeit statistischer Modelle für die Untersuchung des Maanderproblems // *Acta Hydrophys.* 1973. Vol. 17. № 2–3. P. 235–247.
- Sylvester Z., Durkin P., Covault J.A. High curvatures drive river meandering // *Geology.* 2019. № 47 (3). P. 263–266.
<https://doi.org/10.1130/G45608.1>

Probabilistic Study of the Evolution of Landscape Morphological Patterns in the Cryolithozone in Relation to Climate Change

A. S. Victorov^{a,*}, M. V. Arhipova^a, V. N. Kapralova^a, T. V. Orlov^a,
and O. N. Trapeznikova^a

^a*Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russia*

*e-mail: vic_as@mail.ru

The aim of this research is to assess the nature of morphological pattern evolution related to climatic changes for the most typical landscapes in the permafrost zone, including lacustrine thermokarst plains, thermokarst plains with fluvial erosion, and floodplains, based on the probabilistic approach. Twenty-eight key sites in different physiographic environments were selected for study. The key sites were composed of different deposits, such as deltaic, lacustrine-alluvial, alluvial and alluvial-marine, fluvio-glacial, and lake-marsh formations. Based on high-resolution satellite imagery, samples of quantitative characteristics of the landscape morphological patterns under consideration, such as thermokarst lake areas for thermokarst plains and arrow lengths of forming fragments for floodplains, were obtained for two survey dates with 40–55 year intervals. Samples for each site were compared using the Smirnov test. The probabilistic analysis of the quantitative characteristics of morphological patterns for typical permafrost landscapes over 40–55 years leads to the conclusion that the morphological pattern changes are rather limited. At the same time, a statistically confirmed evolution of morphological patterns is observed for a number of key sites of thermokarst plains, but the changes are practically not recorded within the floodplain

landscapes in the considered time interval. The changes of morphological patterns are more intensive for the thermokarst plains with fluvial erosion in comparison with the lacustrine thermokarst plains, which can be explained by a more active response of thermal erosion to climatic changes in comparison with the thermokarst process. The observed changes in morphological patterns are limited to the western part of Western Siberia, but they show landscape differentiation even in the case of close location, which indicates the important role of sediment composition and geocryological conditions.

Keywords: landscape pattern, mathematical morphology of landscapes, cryolithozone plains, climate changes, response to climate changes, thermokarst, remote sensing data

REFERENCES

- Chalov R.S. *Geograficheskie issledovaniya ruslovykh protsessov* [Geographic Studies of Channel Processes]. Moscow: Izd-vo Mosk. Univ., 1979. 232 p.
- Chalov R.S., Chernov A.V. Geomorphological classification of plain rivers flood-plains. *Geomorfol.*, 1985, no. 3, pp. 3–11. (In Russ.).
- Grosse G., Romanovsky V., Walter K., Morgenstern A., Lantuit H., Zimov S. Distribution of thermokarst lakes and ponds at three yedoma sites in Siberia. In *Ninth international conference on permafrost. Vol. 1*. University of Alaska Fairbanks, 2008, pp. 551–556.
- Joung R.W. The patterns of some meandering valleys in New South Wales. *Austral. Geogr.*, 1970, vol. 11, no. 3, pp. 269–277.
- Kapralova V.N. Regularities of the development of thermokarst processes within lake-thermokarst plains (based on approaches of mathematical morphology of the landscape). *Extended Abstract Cand. Sci. (Geolog.) Dissertation*. Moscow: IEG RAS, 2014. 24 p.
- Kapralova V.N., Chesnokova I.V., Makarycheva E.M., Sergeev D.O. Importance of the variability of geocryological conditions in the determination of the significance of the lakes in the structure of regional water discharge. *Water Resour.*, 2019, vol. 46, pp. S81–S86.
- Kotlyakov V.M., Velichko A.A., Glazovsky A.F., Tumskii V.E. The past and present-day Arctic cryosphere. *Her. Russ. Acad. Sci.*, 2015, vol. 85, pp. 251–259. <https://doi.org/10.1134/S1019331615030132>
- Kravtsova V.I., Rodionova T.V. Investigation of the dynamics in area and number of thermokarst lakes in various regions of Russian cryolithozone, using satellite images. *Kriosf. Zemli*, 2016, vol. 20, no. 1, pp. 81–89. (In Russ.).
- Lotsari E., Hackney C., Salmela J., Kasvi E., Kemp J., Alho P., Darby S.E. Sub-arctic river bank dynamics and driving processes during the open channel flow period. *Earth Surf. Process. Landf.*, 2019, vol. 45, no. 5, pp. 1198–1216. <https://doi.org/10.1002/esp.4796>
- Metodicheskoe rukovodstvo po inzhenerno-geologicheskoi s'emke masshtaba 1 : 200000 (1 : 100000–1 : 500000)* [Methodological Guide for Engineering-Geological Survey on the Scale of 1 : 200000 (1 : 100000–1 : 500000)]. Moscow: Nedra Publ., 1978. 391 p.
- Morgenstern A., Overduin P.P., Günther F., Stettner S., Ramage J., Schirrmeister L., Grigoriev M.N., Grosse G. Thermo erosional valleys in Siberian ice-rich permafrost. *Permafr. Periglac. Process.*, 2021, vol. 32, no. 1, pp. 59–75. <https://doi.org/10.1002/ppp.2087>
- Muster S., Riley W.J., Roth K., Langer M., Cresto Aleina F., Koven Ch.D., Lange S., Bartsch A., Grosse G., Wilson C.J., Jones B.M., Boike J. Size distributions of Arctic waterbodies reveal consistent relations in their statistical moments in space and time. *Front. Earth Sci.*, 2019, vol. 7, art. 5. <https://doi.org/10.3389/feart.2019.00005>
- Muster S., Roth K., Langer M., Lange S., Cresto Aleina F., Bartsch A., Morgenstern A., Grosse G., Jones B., Sannel A.B.K., Sjöberg Y., Günther F., Andresen C., Veremeeva A., Lindgren P.R., Bouchard F., Lara M.J., Fortier D., Charbonneau S., Virtanen T.A., Hugelius G., Palmtag J., Siewert M.B., Riley W.J., Koven C.D., Boike J. PeRL: a circum-Arctic Permafrost Region Pond and Lake database. *Earth Syst. Sci. Data*, 2017, vol. 9, pp. 317–348. <https://doi.org/10.5194/essd-9-317-2017>
- Nanson G.C., Croke J.C. A genetic classification of floodplains. *Floodplain Evolution. Geomorphology*, 1992, vol. 4, no. 6, pp. 460–486.
- Nicolisky D.J., Romanovsky V.E., Panda S.K., Marchenko S.S., Muskett R.R. Applicability of the ecosystem type approach to model permafrost dynamics across the Alaska North Slope. *Geophys. Res. Earth Surf.*, 2017, vol. 122, pp. 50–75. <https://doi.org/10.1002/2016JF003852>
- 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, vol. 9, no. 7, art. 640. <https://doi.org/10.3390/rs9070640>
- Olefelt D., Goswami S., Grosse G., Hayes D.J., Hugelius G., Kuhry P., Sannel B., Schuur E.A.G., Turetsky M.R. Arctic circumpolar distribution and soil carbon of thermokarst landscapes. *Nature*, 2016, vol. 7, pp. 1–11. <https://doi.org/10.1038/ncomms13043>
- Panin A.V., Sidorchuk A.Yu., Chernov A.V. Main stages of the flood-plain formation in Northern Eurasia. *Geomorfol.*, 2011, no. 3, pp. 20–31. (In Russ.).
- Pekel J.-F., Cottam A., Gorelick N., Belward A.S. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature*, 2016, vol. 540, pp. 418–422. <https://doi.org/10.1038/nature20584>

- Peschke G. Zur Anwendbarkeit statistischer Modelle für die Untersuchung des Maanderproblems. *Acta Hydrophys.*, 1973, vol. 17, no. 2–3, pp. 235–247. (In German).
- Polishchuk V.Yu. Polishchuk Yu.M. *Geoimitatsionnoe modelirovanie polei termokarstovykh ozer v zonakh merzloty* [Geosimulation Modeling of Fields of Thermokarst Lakes in Permafrost Zones]. Khanty-Mansiysk: UIP YUGU, 2013. 128 p.
- Popov I.V. *Metodologicheskie osnovy gidromorfologicheskoi teorii ruslovogo protsessa: Izbrannye trudy* [Methodological Foundations of the Hydromorphological Theory of the Channel Process. Selected Works]. St. Petersburg: Nestor-Istoriya Publ., 2012. 304 p.
- Sylvester Z., Durkin P., Covault J.A. High curvatures drive river meandering. *Geology*, 2019, vol. 47, no. 3, pp. 263–266.
<https://doi.org/10.1130/G45608.1>
- Trifonova T.A. Methods of morphometric characterization of types and subtypes of the Ob river floodplain based on interpretation of aerial photographs. *Vestn. Mosk. Univ., Ser.: Biol., Pochvoved.*, 1975, no. 5, pp. 15–26. (In Russ.).
- Viktorov A.S., Arkhipova M.V., Kapralova V.N., Orlov T.V., Trapeznikova O.N. Evaluation of climate-induced evolution of the morphological structure of thermokarst plains in the permafrost zone using remote sensing data. *Geoekol. Inzh. Geol. Gidrogeol. Geokriol.*, 2023, no. 2, pp. 76–86. (In Russ.).
<https://doi.org/10.31857/S0869780923020091>
- Viktorov A.S., Kapralova V.N., Orlov T.V., Trapeznikova O.N., Arkhipova M.V., Berezin P.V., Zverev A.V., Panchenko E.N., Sadkov S.A. Analysis of the morphological structure development of the thermokarst-lake plains on the base of the mathematical model. *Geomorfol.*, 2015, no. 3, pp. 3–13. (In Russ.).
<https://doi.org/10.15356/0435-4281-2015-3>