
ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

УДК 551.4.012

ОЦЕНКА ЭВОЛЮЦИИ МОРФОЛОГИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ТЕРМОКАРСТОВЫХ РАВНИН КРИОЛИТОЗОНЫ В СВЯЗИ С КЛИМАТИЧЕСКИМИ ИЗМЕНЕНИЯМИ ПО МАТЕРИАЛАМ КОСМИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ

© 2023 г. А. С. Викторов^{1,*}, М. В. Архипова¹, В. Н. Капралова¹,
Т. В. Орлов¹, О. Н. Трапезникова¹

¹Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева Российской академии наук
Уланский переулок, 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия

*E-mail: vic_as@mail.ru

Поступила в редакцию 11.07.2022 г.

После доработки 04.11.2022 г.

Принята к публикации 21.11.2022 г.

Вопрос изменения геокриологических условий и ландшафта криолитозоны в связи с климатическими изменениями в настоящее время является актуальным и активно изучается многими исследователями. Однако при этом изменению морфологической структуры и количественному анализу уделяется недостаточно внимания. Цель настоящего исследования – количественный анализ морфологической структуры эрозионно-термокарстовой и озерно-термокарстовой равнины. Исследование проведено по материалам космической съемки: архивные снимки Согопа с разрешением 3–12 м/пикс, за 1961–1979 гг. и набор современных снимков высокого разрешения 0.5–2.5 м/пикс за 2008–2019 гг. Анализ изменений морфологической структуры термокарстовых равнин проводился по ключевым участкам, расположенным в зоне сплошной многолетней мерзлоты, на севере Западно-Сибирской низменности, в устье р. Лена, в Восточной Сибири, на Баффиновой Земле. Проверка статистических различий между выборками 1961–1979 и 2013–2019 гг. по критерию Смирнова выявила статистически значимые различия в распределениях площадей озер эрозионно-термокарстовых равнин только на двух участках. На одном из этих участков изменения носят плавный характер с сохранением интегрально-экспоненциального вида распределения площадей озер. Оценка значимости статистических различий за 1964–1976 и 2008–2014 гг. для озерно-термокарстовых равнин выявила значимое различие только для одного участка. Изменение морфологической структуры эрозионно-термокарстовых равнин в связи с климатическими изменениями протекает более интенсивно, чем у озерно-термокарстовых равнин; изменения затронули 22% ключевых участков против 12% у озерно-термокарстовых равнин. Ключевые участки с выявленными изменениями относятся к полуострову Ямал. Устойчивость морфологических структур к климатическим изменениям выше, чем у отдельных компонентов ландшафта. На климатические изменения в первую очередь реагируют эрозионные процессы, что приводит к изменению распределений площадей термокарстовых озер эрозионно-термокарстовых равнин при интенсификации их спуска и превращения в хасыреи.

Ключевые слова: криолитозона, термокарст, математическая модель, морфологическая структура, космическая съемка

DOI: 10.31857/S0869780923020091, EDN: TWPUOG

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время изучаются различные аспекты изменений геокриологических условий криолитозоны и ее ландшафтов в связи с климатическими изменениями [8, 9, 12. и др.]. Однако изменение морфологической структуры ландшафтов криолитозоны рассматривалось в сравнительно небольшом числе работ, как правило, эти исследования касались изменения заозеренности ландшафтов, включая инвентаризацию ко-

личества и площадей озер, и иногда их динамики [5–7, 13]. Авторами работ [10, 11] сделана не вполне удачная попытка подобрать функцию, описывающую распределения площадей озер. Современные средства обработки космической съемки позволяют работать с большими площадями, чему посвящено большое количество исследований [13–15]. Однако очень малое количество исследований посвящено изменению количественных характеристик морфологической структуры

ландшафтов криолитозоны. Крайне редко исследователи предлагали модели, описывающие поведение количественных характеристик морфологических структур.

Цель настоящего исследования — количественный анализ изменения морфологической структуры одного из наиболее распространенных типов ландшафтов криолитозоны — термокарстовых равнин.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование охватило два вида наиболее распространенных ландшафтов термокарстовых равнин:

- озерно-термокарстовые равнины,
- эрозионно-термокарстовые равнины.

Методика изучения изменения морфологической структуры изучаемых ландшафтов включала следующие этапы:

- выбор параметров для сравнения морфологической структуры изучаемых ландшафтов в разное время на основе соответствующей модели;
- выбор эталонных участков по данным дистанционного зондирования, литературным и иным источникам и выделение термокарстовых озер как наиболее мобильных элементов морфологической структуры исследуемых ландшафтов в пределах ключевых участков;
- сравнение эмпирических распределений площадей термокарстовых озер за два срока для каждого участка на основе статистического критерия Смирнова;
- сравнение значений параметров морфологических структур ландшафта каждого участка за разные сроки;
- анализ выявленных тенденций.

Выбор участков осуществлялся по материалам космической съемки, литературным и картографическим данным. Главным требованием являлась генетическая, ландшафтная и морфологическая однородность, его соблюдения достигалось путем анализа снимков и дополнительных источников информации. Подбор материалов дистанционных съемок эталонных участков озерно-термокарстовых равнин и эрозионно-термокарстовых равнин осуществлялся с учетом необходимости обеспечения двух сроков съемки каждого участка, обеспечения возможно большего интервала между съемками, максимизации пространственного разрешения материалов дистанционных съемок.

При исследовании использовались следующие материалы космической съемки:

- архивные снимки Corona с разрешением 3—12 м/пикс, даты съемки — июнь—август 1965—1976 гг.;

— современные снимки со спутников IKONOS, QuickBird, Worldview 2, Geoeye-1, Pleiades, SPOT-5, SPOT-6 высокого разрешения 0.5—2.5 м/пикс, полученные как из открытых источников (Google earth, yandex maps, Bing), так и специально приобретенные (ИТЦ СКАНЭКС).

В итоге был сформирован комплекс материалов аэро- и космических съемок для решения поставленных задач. Более детальные характеристики используемых съемок приведены в табл. 1.

Выделение термокарстовых озер и определение их площади производилось на базе геоинформационной системы ARCGIS как автоматизированным методом, так и в ручном режиме. При этом использовались известные дешифровочные признаки термокарстовых озер [4].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Озерно-термокарстовые равнины представляют собой поверхность с пологоволнистым или пологохолмистым рельефом с развитием тундровой или лесотундровой растительности с вкраплениями термокарстовых озер. Термокарстовые озера часто имеют округлые формы и в беспорядке разбросаны по территории (рис. 1а,б). Иногда из-за слияния встречаются озера формы восьмиугольника или фестончатой формы.

В выполненных ранее работах показано, что распределение площадей озер озерно-термокарстовых равнин отвечает гипотезе возникновения первичных термокарстовых очагов (озер) за сравнительно короткий период [1].

Полная модель морфологической структуры озерно-термокарстовых равнин [3] содержит два свободных изменяющихся параметра, которые и следует выбрать при сравнении морфологической структуры за разные сроки:

- среднее значение логарифма площади озера $a(t)$;
- дисперсия логарифма площади озера $\sigma^2(t)$.

Один из полученных ранее итогов анализа модели — площади термокарстовых озер в любой момент времени имеют логнормальное распределение:

$$f(x, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma(t)x}} e^{-\frac{(\ln x - a(t))^2}{2\sigma^2(t)}},$$

где t — время, прошедшее с начала процесса.

Для проведения исследований выбраны 8 участков разных в геоморфологическом, геокриологическом и физико-географическом отношении и расположенных в различных регионах — Таймыр, Ямал, Колымская низменность, дельта р. Лена, Аляска (рис. 2). Участки по данным государственной геологической съемки сложены песча-

Таблица 1. Характеристика использованных материалов дистанционных съемок

Участок	Срок 1			Срок 2			Период между съемками, лет
	Носитель	Дата съемки	Разрешение, м	Носитель	Дата съемки	Разрешение, м	
Озерно-термокарстовые равнины							
as 3	Corona	22.07.1976	1.2	SPOT 5	14.09.2011	2.5	35
as 10	«	13.07.1964	2.7	SPOT 5	17.07.2011	2.5	47
as 14	Тот же	19.08.1976	1.2	WorldView2	09.07.2014	0.5	38
as 16	«	21.07.1965	2.7	QuickBird	23.06.2011	0.64	46
as 19	«	22.07.1965	2.7	SPOT 5	11.08.2008	2.5	43
as S21	«	14.08.1966	2.7	Тот же	10.08.2008	2.5	42
as 23	«	01.08.1976	1.2	«	05.07.2011	0.64	35
as 31	«	21.08.1968	1.8	Worldview2	24.06.2011	0.5	43
Эрозионно-термокарстовые равнины							
19	Corona	14.08.1967	1.2	WorldView2	28.07.2013	0.5	46
20	Тот же	26.07.1972	1.2	Тот же	24.08.2018	0.5	46
21	«	21.07.1965	4	«	10.07.2013	0.5	48
22	«	21.07.1965	3.4	Sentinel	11.08.2018	10	53
24	«	31.08.1978	3	SPOT 7	15.09.2015	1.5	37
25	«	21.08.1968	2.1	Тот же	03.08.2019	1.5	51
30	«	07.07.1961	2	«	17.09.2017	1.5	56
31	«	04.07.1979	10	WorldView2	01.07.2017	0.5	38
40	«	29.07.1969	2.2	SPOT 7	07.08.2015	1.5	46

ными дельтовыми отложениями; озерно-аллювиальными горизонтально слоистыми алевроитами, переслаивающимися с песками и торфами, а также суглинками и супесями; флювиогляциальными песками и валунными суглинками; морскими отложениями, представленными пылеватыми песками, песчаными, супесчаными и суглинистыми отложениями. Для участков характерно сплошное распространение многолетнемерзлых пород.

Пример сравнения распределений площадей озер приведен на рис. 3а,б). Полное сравнение распределений для каждого участка по критерию Смирнова выполнялось помощью программы Statistica 12. Результаты приведены в табл. 2.

Сравнение параметров распределения площадей озер за два срока для озерно-термокарстовых равнин основывалось на критерии Стьюдента и критерии Фишера с учетом логнормальности распределений, результаты приведены в табл. 3 и 4.

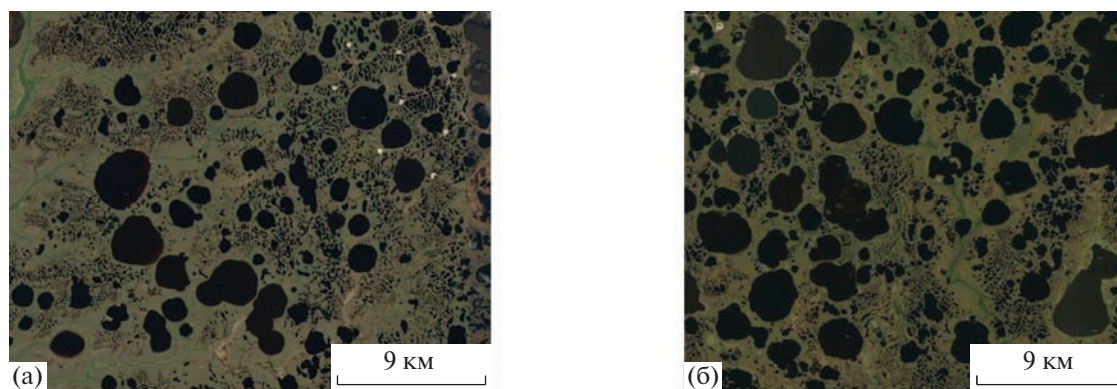
**Рис. 1.** Типичные изображения озерно-термокарстовой равнины на материалах космической съемки.



Рис. 2. Схема расположения ключевых участков при изучении озерно-термокарстовых равнин.

Эрозионно-термокарстовая равнина обычно представляет собой слабоволнистую субгоризонтальную поверхность с преобладанием различной тундровой или лесотундровой растительности, в которую вкраплены озера и хасыреи, а также местами развита нечастая эрозионная сеть (рис. 4а,б). Озера часто имеют округлую форму и беспорядочно разбросаны по равнине. Хасыреи представляют собой плоскодонные и пологосклонные заторфованные понижения также изометричной формы, занятые луговой или болотной расти-

тельностью и аналогично озерам в беспорядке располагающиеся на равнине. Внутри хасыреев могут оставаться мелкие остаточные озера по периферии и крупные озера в центральной части. В пределах хасыреев возможно новообразование мерзлоты и развитие бугров пучения. В соответствии с взглядами большинства исследователей, хасыреи образуются в результате осушения термокарстовых озер, чаще всего в результате эрозионной деятельности водотоков.

В выполненных ранее работах показано, что распределение площадей озер эрозионно-термокарстовых равнин отвечает гипотезе постоянного возникновения первичных термокарстовых очагов (озер), это может быть объяснено продолжающимся формированием новых термокарстовых озер в пределах постоянно возникающих хасыреев.

Разработанная модель морфологической структуры эрозионно-термокарстовой равнины (например, [2]) позволила показать, что при весьма общих условиях при длительном времени развития наступает состояние динамического равновесия, характеризующееся стабилизацией большинства характеристик, в частности, следующих:

– распределение площади озера (плотность распределения) при площади первичного термокарстового понижения ε (интегрально-экспоненциальное распределение):

$$f_{sl}(x, \infty) = -\frac{1}{xEi(-\gamma\varepsilon)} e^{-\gamma x}, \quad x \geq \varepsilon,$$

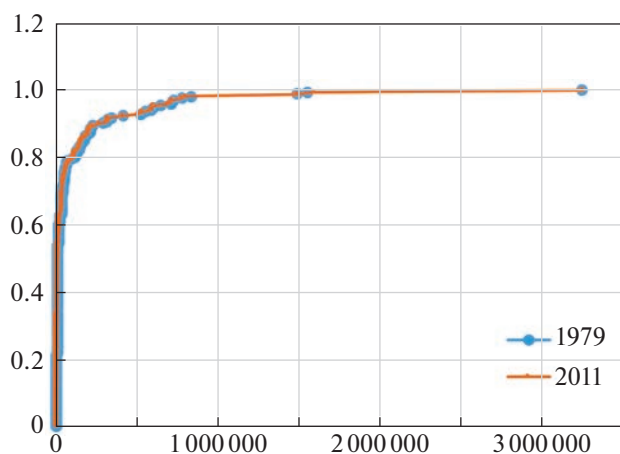


Рис. 3. Пример сопоставления распределений площадей озер за разные сроки в пределах озерно-термокарстовых равнин (участок as3).

Таблица 2. Сопоставление распределения площадей озёр термокарстовых равнин за два срока с использованием критерия Смирнова *

Участок	Объем выборки		Значение критерия	<i>p</i>
	Срок 1	Срок 2		
<i>Озерно-термокарстовые равнины</i>				
as3	180	176	0.152	<i>p</i> < 0.05
as10	167	167	0.036	<i>p</i> > 0.10
as14	153	154	0.048	<i>p</i> > 0.10
as16	584	576	0.031	<i>p</i> > 0.10
as19	209	209	0.038	<i>p</i> > 0.10
as21	351	345	0.024	<i>p</i> > 0.10
as23	109	108	0.048	<i>p</i> > 0.10
as 1	207	210	0.028	<i>p</i> > 0.10
<i>Эрозионно-термокарстовые равнины</i>				
20	359	372	0.150	<i>p</i> < 0.001
21	430	433	0.040	<i>p</i> > 0.10
24	381	362	0.100	<i>p</i> < 0.05
25	314	309	0.073	<i>p</i> > 0.10
19	205	205	0.078	<i>p</i> > 0.10
22	291	298	0.056	<i>p</i> > 0.10
30	524	522	0.043	<i>p</i> > 0.10
31	100	95	0.040	<i>p</i> > 0.10
40	553	549	0.043	<i>p</i> > 0.10

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

Таблица 3. Результаты сравнения значений среднего логарифма площадей озёр за два срока

Участок	Среднее логарифма площади		Критерий Стьюдента	Критическое значение на уровне 0.95
	1 срок	2 срок		
as3	9.64	9.42	1.05	1.96
as10	11.94	11.92	0.13	То же
as14	11.63	11.55	0.53	«
as16	10.14	10.17	0.29	«
as19	10.90	10.92	0.16	«
as21	10.83	10.82	0.10	«
as 3	12.21	12.17	0.21	«
as31	9.11	8.99	0.22	«

— распределение площади хасырея (экспоненциальное распределение):

— заозеренность, удовлетворяющая выражению:

$$F(x) = 1 - e^{-\gamma(x-\varepsilon)}, \quad x \geq \varepsilon$$

$$\ln(1 - P^*) = -\frac{\lambda}{2\gamma a} e^{-\gamma\varepsilon} [1 - P^*],$$

— средняя плотность расположения термокарстовых озёр:

где a — скорость роста среднего логарифма площади, λ — среднее число озёр, возникающих в единицу времени на единице площади; γ — средняя плотность расположения истоков эрозионных форм.

Таблица 4. Результаты сравнения дисперсии логарифма площадей озер за два срока

Участок	Дисперсия логарифма площади		Критерий Фишера	Критическое значение на уровне 0.95
	1 срок	2 срок		
as3	3.50	4.30	1.23	1.14*
as10	2.04	2.07	1.02	1.18
as14	1.64	1.81	1.10	1.18
as16	2.97	3.12	1.05	1.06
as19	1.51	1.54	1.02	1.14
as21	1.53	1.61	1.05	1.10
as 3	1.88	1.95	1.04	1.26
as31	5.64	5.48	1.01	1.14

* Случай статистически значимого различия выделен жирным шрифтом.

Таким образом, как видно из приведенных выражений, основными формальными параметрами, *полностью характеризующими все свойства морфологической структуры* при ее развитии, которые определяют значения всех других количественных характеристик, являются:

– отношение плотности генерации новых термокарстовых очагов и скорости роста логарифма размера $\frac{\lambda}{a}$,

– среднее значение плотности расположения истоков эрозионных форм γ ,

– площадь первичного термокарстового понижения ϵ .

Вместо данных формальных параметров при изучении изменения морфологической структуры может быть использован другой набор параметров:

– средняя площадь термокарстового озера $\bar{s}_l$,
– средняя плотность расположения термокарстовых озер η ,

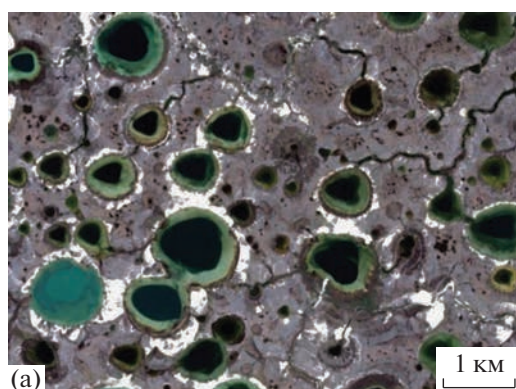
– площадь первичного термокарстового очага (последний не использовался в силу незначительного изменения).

Эти параметры, как нетрудно получить на основе приведенных соотношений, взаимоднозначно связаны с первым набором:

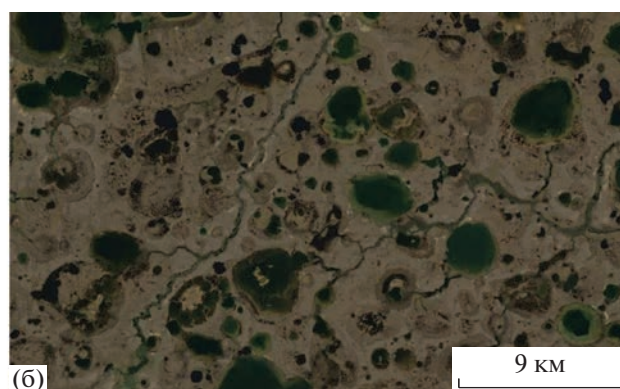
$$\bar{s}_l = -\frac{1}{\gamma Ei(-\gamma\epsilon)} e^{-\gamma\epsilon}, \quad \eta = -\frac{\lambda}{2a} Ei(-\gamma\epsilon) e^{-\eta\bar{s}_l}, \quad (6)$$

и в силу этого также полностью характеризуют структуру и ее изменение. Кроме того, они прямо определяются по измерениям, а значимость их изменений легко поддается статистической оценке.

Анализ изменений морфологической структуры эрозионно-термокарстовых равнин проводился на базе ключевых участков, для которых имелось два срока наблюдения (срок 1: 1961–1979 гг., срок 2: 2013–2019 гг.). Выбранные 9 участков представляют основные исследованные нами регионы криолитозоны и расположены на севере Западно-Сибирской низменности, в устье р. Лена, в Восточной Сибири, на Баффиновой Земле (рис. 5). Участки сложены аллювиально-морскими



(а)



(б)

Рис. 4. Типичное изображение эрозионно-термокарстовой равнины на космическом снимке.

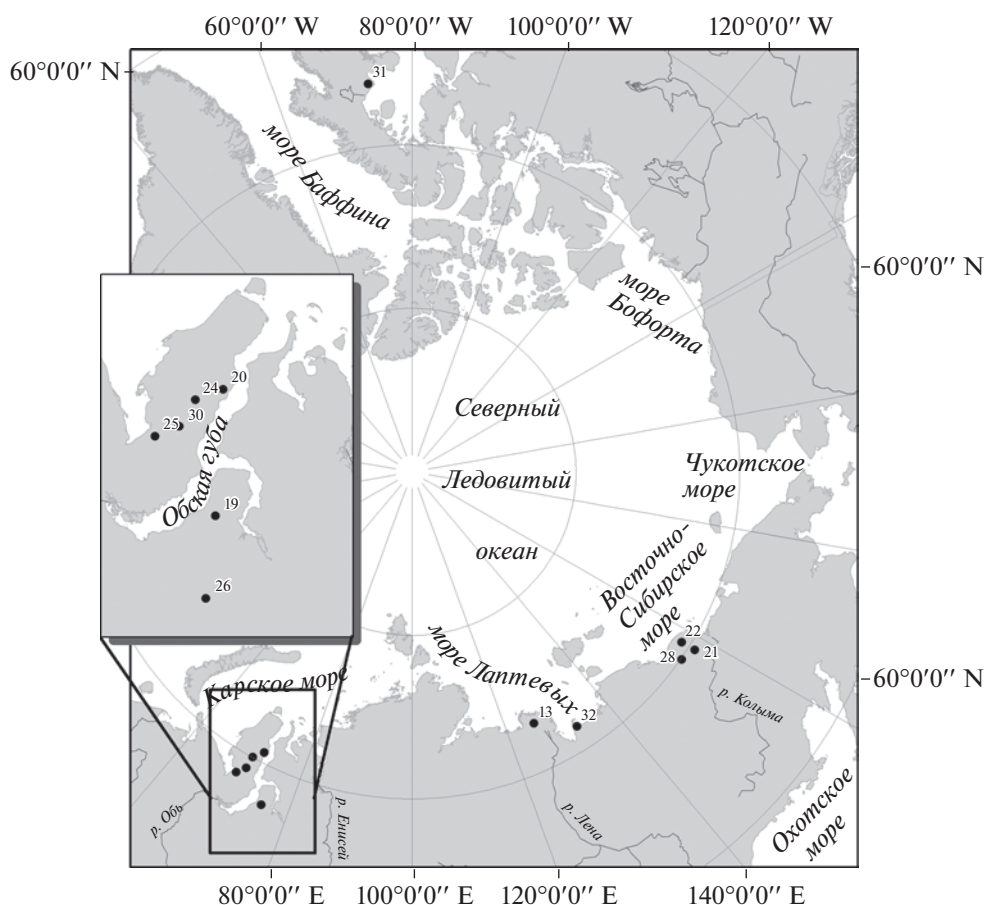


Рис. 5. Схема расположения ключевых участков эрозионно-термокарстовых равнин.

ми отложениями, супесями и песками, озерно-болотными образованиями, морскими отложениями, представленными желто-бурыми песками, мелко- и среднезернистыми. Для участков характерно сплошное распространение ММП.

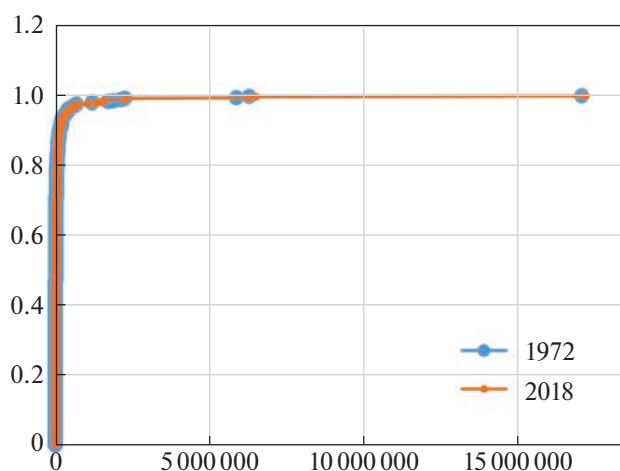


Рис. 6. Пример сопоставления распределений площадей озер за разные сроки в пределах озерно-термокарстовых равнин (участок 20).

Проведенное сопоставление распределений площадей озер за два срока позволило получить результаты, отраженные в табл. 1 и на рис. 6.

Оценим значимость различий выбранных параметров, полностью отражающих морфологическую структуру. Значения, как средней площади озер, так и плотности расположения озер представляют собой суммы большого числа случайных величин, и поэтому согласно центральной предельной теореме их распределение близко к нормальному; это позволяет нам использовать критерий Стьюдента для оценки значимости различий этих параметров (табл. 5, 6).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В целом проведенное исследование позволяет сделать вывод, что использование материалов космических съемок дает достоверную информацию об изменении морфологической структуры ландшафтов криолитозоны в связи с климатическими изменениями, наземными методами подобные изменения зафиксировать крайне сложно, в отличие от изменения отдельных компонентов ландшафта.

Таблица 5. Сопоставление изменений средней площади озера на ключевых участках эрозионно-термокарстовых равнин

Участок	Площадь участка, км ²	Средняя площадь озера, км ²		Критерий Стьюдента	Критическое значение критерия на уровне 0.95
		1 срок	2 срок		
19	207	0.049	0.043	0.53	1.96
20	450	0.126	0.134	0.11	То же
21	1158	0.225	0.233	0.20	«
22	2867	0.314	0.333	0.23	«
24	154	0.073	0.072	0.03	«
25	202	0.083	0.075	0.72	«
30	442	0.058	0.054	0.61	«
31	846	0.908	0.761	0.83	«
40	670	0.032	0.028	1.04	«

Таблица 6. Сопоставление изменений средней плотности расположения озера на ключевых участках эрозионно-термокарстовых равнин

Участок	Средняя плотность расположения озера, км ⁻²		Критерий Стьюдента	Критическое значение на уровне 0.95
	1 срок	2 срок		
19	0.99	0.99	0	1.96
20	0.80	0.83	0.50	То же
21	0.37	0.37	0	«
22	0.10	0.10	0	«
24	2.47	2.35	0.68	«
25	1.55	1.53	0.16	«
30	1.19	1.18	0.14	«
31	0.12	0.11	0.61	«
40	0.83	0.82	0.20	«

Анализ результатов обработки заставляет сделать вывод, что изменение распределений площадей термокарстовых озер эрозионно-термокарстовых равнин носит ограниченный характер.

Проверка статистических различий между выборками 1961–1979 и 2013–2019 гг. для каждого ключевого участка эрозионно-термокарстовых равнин по критерию Смирнова не выявила статистические значимые различия в распределениях площадей озер в 7 случаях из 9 (см. табл. 2), и различия наблюдаются только на двух участках. Дополнительный анализ показал, что при этом на одном из этих участков изменения носят плавный характер с сохранением интегрально-экспоненциального вида распределения площадей озер, а значит с сохранением динамического равновесия. Анализ изменений основных параметров (см. табл. 5 и 6) показывает несущественные отклонения (на уровне 0.95) по критерию Стьюдента.

Морфологическая структура озерно-термокарстовых равнин, прежде всего ее количественные характеристики, которые, как вытекает из математической модели, полностью описывают эту структуру, по данным, полученным на ключевых участках, не демонстрирует в настоящее время реальной трансформации, несмотря на происходящие климатические изменения.

Действительно оценка значимости статистических различий между двумя выборками площадей термокарстовых озер за 1964–1976 и 2008–2014 гг. по критерию Смирнова для каждого ключевого участка выявила статистически значимое различие только для одного участка аs3 (см. табл. 2). Сравнение параметров моделей – средних логарифмов площадей термокарстовых озер для двух сроков по каждому участку и аналогично дисперсий логарифмов площадей термокарстовых озер (см. табл. 3, 4) – показало некоторое уменьшение

среднего логарифма на всех участках за исключением двух (as19, as16) и некоторый рост дисперсии на всех участках за исключением одного (as31). Однако применение статистических критериев Фишера и Стьюдента подтверждает отсутствие значимых (на уровне значимости 0.95) различий соответствующих параметров для двух сроков съемки; отличия на названном уровне значимости обнаружены только для дисперсии участка as3.

Таким образом, можно сделать вывод, что изменение морфологической структуры эрозионно-термокарстовых равнин в связи с климатическими изменениями протекает несколько более интенсивно, чем у озерно-термокарстовых равнин; изменения затронули 22% ключевых участков против 12% у озерно-термокарстовых равнин.

Представляется интересным, что ключевые участки, на которых выявлены изменения, тяготеют к полуострову Ямал, это относится и к озерно-термокарстовым и к эрозионно-термокарстовым равнинам. В целом три участка, на которых отмечаются статистически значимые изменения из 17 изученных ключевых участков термокарстовых равнин расположены на названной территории. Конечно число ключевых участков пока недостаточно для уверенных выводов, однако возможно обнаруженная приуроченность указывает на более интенсивный ход изменений именно в этом районе.

Представляется вероятным, что устойчивость морфологических структур (ландшафтного рисунка), прежде всего количественных характеристик к климатическим изменениям, несколько выше, чем отдельных компонентов ландшафта.

Различная степень изменения морфологической структуры проанализированных ландшафтов может быть объяснена тем, что на климатические изменения в первую очередь реагируют эрозионные, а не термокарстовые процессы, изменение эрозионных процессов приводит к изменению распределений площадей термокарстовых озер эрозионно-термокарстовых равнин при интенсификации их спуска и превращения в ха-сыреи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Викторов А.С., Капралова В.Н., Орлов Т.В., Трпезникова О.Н. и др. Анализ развития морфологической структуры озерно-термокарстовых равнин на основе математической модели // Геоморфология. 2015. № 3. С. 3–13.
2. Викторов А.С., Капралова В.Н., Орлов Т.В., Трпезникова О.Н. и др. Математическая морфология ландшафтов криолитозоны. 2016. М.: РУДН, 232 с.
3. Викторов А.С. Математическая модель термокарстовых озерных равнин как одна из основ интерпретации материалов космических съемок // Исследование Земли из космоса. 1995. № 5. С. 42–50.
4. Методическое руководство по инженерно-геологической съемке масштаба 1 : 200 000 (1 : 100 000–1 : 500 000) / ВНИИ гидрогеологии и инж. Геологии. [Е.С. Мальников, Н.Г. Вережский, Л.А. Островский и др.]. М.: Недра. 1978. 391 с.
5. Полищук В.Ю., Полищук Ю.М. Геоимитационное моделирование полей термокарстовых озер в зонах мерзлоты: монография. Ханты-Мансийск: УИП ЮГУ, 2013. 128 с.
6. Grosse G., Romanovsky V., Walter K. et al. Distribution of thermokarst lakes and ponds at three yedoma sites in Siberia. 2008.
7. Kravtsova V.I., Rodionova T.V. Research of the dynamics of the area and number of thermokarst lakes in different regions of the permafrost zone of Russia using satellite images // Cryosphere of the Earth. 2016. V. 20. № 1. P. 81–89.
8. Kotlyakov V.M., Velichko A.A., Glazovsky A.F., Tumska-ya V.E. The past and present of the Arctic cryosphere // Bulletin of the Russian Academy of Sciences, 2015. V. 85. No 5–6. P. 463–471.
9. Morgenstern A., Overduin P.P., Günther F., et al. Thermo-erosional valleys in Siberian ice-rich permafrost // Permafrost and Periglac Process. 2020. N. 32 (1). P. 59–75.
<https://doi.org/10.1002/ppp.2087>
10. Muster S. et al. Size distributions of Arctic waterbodies reveal consistent relations in their statistical moments in space and time // Frontiers in Earth Science. 2019. V. 7. P. 5.
<https://doi.org/10.3389/feart.2019.00005>
11. Muster S., Roth K., Langer M., Lange S., et al. PeRL: a circum-Arctic Permafrost Region Pond and Lake database // Earth Syst. Sci. Data, 2017. V. 9. P. 317–348.
<https://doi.org/10.5194/essd-9-317-2017>
12. 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 // J. Geophys. Res. Earth Surf. 2017. V. 122. P. 50–75.
<https://doi.org/10.1002/2016JF003852>
13. Nitze I., Grosse G., Jones B.M., Arp C.D., et al. Landsat-Based Trend Analysis of Lake Dynamics across Northern Permafrost Regions // Remote Sensing. 2017. V. 9. № 7.
<https://doi.org/10.3390/rs9070640>
14. Olefeldt D., Goswami S., Grosse G., Hayes D.J., et al. Arctic Circumpolar Distribution and Soil Carbon of Thermokarst Landscapes // Nature Communications. 2016.
<https://doi.org/10.3334/ORNLDAAAC/1332>
15. Pekel J.-F., Cottam A., Gorelick N., Belward A. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes // Nature. 2016.
<https://doi.org/10.1038/nature20584>

EVALUATION OF CLIMATE-INDUCED EVOLUTION OF THE MORPHOLOGICAL STRUCTURE OF THERMOKARST PLAINS IN THE PERMAFROST ZONE USING REMOTE SENSING DATA

A. S. Viktorov^{a, #}, M. V. Arkhipova^a, V. N. Kapralova^a, T. V. Orlov^a, and O. N. Trapeznikova^a

^aSergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences,
Ulansky per., 13, str. 2, Moscow, 101000 Russia

[#]E-mail: vic_as@mail.ru

Changing geocryological conditions and the permafrost zone landscape due to climate change is currently an acute issue actively studied by many researchers. However, insufficient attention is paid to the change in the morphological structure and quantitative analysis. The aim of the study was a quantitative analysis of morphological structure of the thermokarst plains with fluvial erosion and lacustrine thermokarst plains. The study was carried out based on satellite imagery, including archival images of Corona with a resolution of 3–12 m/pix, for 1961–1979, and a set of modern high-resolution images of 0.5–2.5 m/pix for 2008–2019. Analysis of changes in the morphological structure of thermokarst plains was carried out in 9 key areas located in the zone of continuous permafrost, in the north of the West Siberian Lowland, at the mouth of the Lena River, in Eastern Siberia, on Baffin Island. Checking statistical differences between samples 1961–1979 and 2013–2019 using the Smirnov criterion revealed statistically significant differences in the distributions of lake areas of the thermokarst plains with fluvial erosion in only two sites. In one of these areas, the changes are of a smooth and integral-exponential form of the distribution of lake areas preserved. Assessment of the significance of statistical differences for 1964–1976 and 2008–2014 for the thermokarst plains revealed a significant difference for only one area. The change in the morphological structure of the thermokarst plains with fluvial erosion due to climatic changes is more intense than that of thermokarst plains; changes affected 22% of key areas versus 12% near thermokarst plains with fluvial erosion. Key areas where changes have been identified are located on the Yamal Peninsula. The resistance of morphological structures to climatic changes is higher than that of individual components of the landscape. Erosion processes are the first to respond to climatic changes, and the change in these processes leads to a change in the distribution of the areas of thermokarst lakes in thermokarst plains with fluvial erosion during the intensification of their descent and transformation into khasyres.

Keywords: cryolithozone, thermokarst, mathematical model, morphological structure, satellite imagery

REFERENCES

1. Viktorov, A.S., Kapralova, V.N., Orlov, T.V., Trapeznikova, O.N., et al. *Analiz razvitiya morfologicheskoi struktury ozero-termokarstovykh ravnin na osnove matematicheskoi modeli* [Analysis of the development of the morphological structure of lacustrine-thermokarst plains based on a mathematical model]. *Geomorfologiya*, 2015, no. 3, pp. 3–13. (in Russian)
2. Viktorov, A.S., Kapralova, V.N., Orlov, T.V., Trapeznikova, O.N., et al. *Matematicheskaya morfologiya landshaftov kriolitozony* [Mathematical morphology of permafrost landscapes]. Moscow, RUDN Publ., 2016, 232 p. (in Russian)
3. Viktorov, A.S. *Matematicheskaya model' termokarstovykh ozernykh ravnin kak odna iz osnov interpretatsii materialov kosmicheskikh s'emok* [Mathematical model of thermokarst lacustrine plains as one of the bases for interpreting satellite imagery data]. *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 1995, no. 5, pp. 42–50. (in Russian)
4. *Metodicheskoe rukovodstvo po inzhenerno-geologicheskoi s'emke masshtaba 1 : 200000 (1 : 100000–1 : 500000)* [Guidelines for engineering geological surveying at a scale of 1:200000 (1:100000–1:500000)]. E.S. Malnikov, N.G. Vereiskii, L.A. Ostrovskii, et al. Moscow, Nedra Publ., 1978, 391 p. (in Russian)
5. 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 Publ., 2013, 128 p. (in Russian)
6. Grosse, G., Romanovsky V., Walter, K. et al. Distribution of thermokarst lakes and ponds at three yedoma sites in Siberia // Proc. ninth international conference on Permafrost, 2008, pp. 551–556.
7. Kravtsova, V.I., Rodionova, T.V. Research of the dynamics of the area and number of thermokarst lakes in different regions of the permafrost zone of Russia using satellite images. *Cryosphere of the Earth*, 2016, vol. 20, no. 1, pp. 81–89.
8. Kotlyakov, V.M., Velichko, A.A., Glazovsky, A.F., Tumskaya, V.E. The past and present of the Arctic cryosphere. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences*, 2015, vol. 85, no. 5/6, pp. 463–471.
9. Morgenstern, A., Overduin, P.P., Günther, F. et al. Thermo-erosional valleys in Siberian ice-rich permafrost.

- frost. *Permafrost and Periglac Process*, 2020. no. 32 (1), pp. 59–75. <https://doi.org/10.1002/ppp.2087>
10. Muster, S. et al. Size distributions of Arctic waterbodies reveal consistent relations in their statistical moments in space and time, *Frontiers in Earth Science*. 2019, vol. 7, p. 5.
 11. Muster, S., Roth, K., Langer, M., Lange, S., et al. 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>
 12. Nicolsky, D.J., Romanovsky, V.E., Panda, S.K., et al. Applicability of the ecosystem type approach to model permafrost dynamics across the Alaska North Slope. *J. Geophys. Res. Earth Surf.*, 2017, vol. 122, pp. 50–75. <https://doi.org/10.1002/2016JF003852>
 13. Nitze, I., Grosse, G., Jones, B.M., et al. Landsat-based trend analysis of lake dynamics across Northern permafrost regions, *Remote Sens.*, 2017, no. 9, p. 640. <https://doi.org/10.3390/rs9070640>
 14. Olefeldt, D., Goswami, S., Grosse, G., Hayes, D.J., et al. Arctic circumpolar distribution and soil carbon of thermokarst landscapes. *Nature Communications*, 2016. <https://doi.org/10.3334/ORNLDAAAC/1332>
 15. Pekel, J.-F., Cottam, A., Gorelick, N., Belward, A. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature*, 2016, 540 p. <https://doi.org/10.1038/nature20584>