

УДК 528.873

## ВОЗМОЖНОСТЬ КОЛИЧЕСТВЕННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОПОЛЗНЕВЫХ ПРОЦЕССОВ ТЕРМОАБРАЗИОННЫХ БЕРЕГОВ В КРИОЛИТОЗОНЕ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА МОРФОЛОГИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ПО ОДНОКРАТНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СЪЕМКЕ

© 2024 г. А. С. Викторов<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН,  
Уланский пер. 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия

\*E-mail: vic\_as@mail.ru

Поступила в редакцию 27.06.2024 г.

После доработки 02.07.2024 г.

Принята к публикации 20.07.2024 г.

Цель настоящего исследования — изучение возможности количественного определения динамических параметров оползневых процессов термоабразионных берегов в криолитозоне на основе анализа морфологической структуры этих берегов по материалам однократных космических съемок. Эмпирическое изучение проводилось на шести ключевых участках полуостровов Канин нос, Гыдан и Ямал. Из проведенного анализа следует, что вероятностное распределение размеров термоцирков, наблюдаемых в каждый момент, отличается от распределения размеров, образующихся молодых термоцирков (соответственно, оползней) за счет полного стирания термоцирка или его части в процессе развития берега. Результаты математического моделирования показали, что в условиях относительно однородного по геологическим и геокриологическим характеристикам абразионного склона устанавливается динамическое равновесие, проявляющееся в стабилизации средних размеров термоцирков и вероятностного распределения их размеров по простиранию склона. Наблюдаемые тенденции изменения средних размеров термоцирков на изученных ключевых участках (согласно эмпирическим данным) соответствуют выводу о существовании динамического равновесия в развитии морфологической структуры берегов. Получена аналитическая зависимость, дающая принципиальную возможность по наблюдаемой морфологической структуре термоабразионных берегов на снимке однократной космической съемки определить вероятностное распределение размеров формирующихся молодых оползней без стационарных наблюдений. Плотность генерации формирующихся оползней по морфологической структуре термоабразионных берегов не определяется. Результат исследования может быть использован при прогнозе отступления береговой линии и прогнозе оползневых процессов на термоабразионных берегах криолитозоны.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, морфологические особенности оползней, термоабразионные берега, математическая морфология ландшафта, морфологические структуры, динамическое равновесие

DOI: 10.31857/S0869780924060041 EDN: AMBARC

### ВВЕДЕНИЕ

Обширная группа работ посвящена исследованию оползневых процессов в связи с отступанием берегов в зоне развития многолетнемерзлых пород [1, 9, 12, 13], а также ландшафтными факторами, влияющими на развитие процессов [2, 7, 10, 11], и их связи с климатическими характеристиками [14]. Для прогноза динамики берегов криолитозоны одним из наиболее важных моментов является определение динамических параметров развивающихся процессов, например, скорости отступления, размеров оползневых блоков, частоты генерации оползней во времени и вдоль береговой линии. Подобные

параметры определяются в большинстве исследований прямыми стационарными наблюдениями; для обеспечения достаточной точности определений это требует наблюдений значительной длительности. В силу этого представляет большой интерес поиск возможности определения значений параметров по однократным наблюдениям без длительных рядов. По сути, это представляет собой одну из задач индикации процессов [6], но в количественной области. Очевидно, такая задача имеет и фундаментальное значение, так как, по сути, относится к проблеме соотношения количественных параметров, характеризующих облик ландшафта, и параметров, характеризующих протекающие

в нем процессы. Цель исследования – изучение возможности количественного определения динамических параметров оползневых процессов термоабразионных берегов в криолитозоне на основе анализа морфологической структуры этих берегов по материалам однократных космических съемок.

### МЕТОДИКА

Ландшафт термоабразионных берегов с развитием оползневых процессов представляет собой комплекс термоцирков, включающих в себя оползневые тела разного возраста и поверхности с развитием разнообразных интенсивных процессов (термоабразионных, эрозионных, обвально-осыпных и термоденудационных). Характерной особенностью термоцирков является четкая граница с прилегающей водораздельной поверхностью, хорошо выделяемая на материалах космических съемок. Граница представляет собой обычно систему дуг, прилегающих друг к другу; подобный характер границы связан с тем, что формирование термоцирка начинается, как правило, с развития оползневого процесса. Нередко в пределах термоцирка также присутствуют дугообразные остаточные участки водораздельной поверхности, отвечающие различным стадиям оползания. Типичный вид термоабразионных берегов представлен на рис. 1.

В сфере изучения, как показывает анализ, находятся две основные характеристики:

- вероятностное распределение размеров формирующихся молодых оползней,
- плотность генерации формирующихся оползней, т.е. среднее число оползней, возникающих за единицу времени на единицу длины береговой линии.



**Рис. 1.** Типичное изображение термоабразионных берегов с развитием термоцирков в криолитозоне на материалах космической съемки.

Подход к решению поставленной задачи может базироваться на разработанной модели морфологической структуры термоабразионных берегов криолитозоны. Развитие подобных берегов происходит под действием комплекса процессов:

- появление на том или ином участке нового формирующегося термоцирка,
- стирание частей уже существующих термоцирков за счет наложения более молодых (“боковое стирание”) с сохранением общего числа термоцирков,
- увеличение числа термоцирков за счет формирования нового термоцирка внутри границ уже существующего с его разбиением на две части,
- уменьшение числа термоцирков за счет полного стирания термоцирков при наложении более молодых.

При таком развитии граница берегового склона и прилегающей водораздельной поверхности представляет собой сочетание дуг термоцирков. Часть дуг является новой, не затронутой последующими стираниями, а другая часть – остаточные, сохранившиеся после одно-, двух-, трех- и т.д. кратных частичных стираний существующих термоцирков новыми. Таким образом, в целом на материалах дистанционных съемок в случайный момент времени (съемка) наблюдается совокупность разновозрастных термоцирков, находящаяся в постоянном изменении.

Для решения поставленной задачи использована предложенная нами ранее модель формирования морфологической структуры прямолинейного длинного термоабразионного берега с однородными физико-географическими, геологическими и геокриологическими условиями, предполагается также относительное постоянство во времени климатических условий [4]. Модель основывается на следующих допущениях:

- вероятность формирования новых термоцирков (в количестве  $k = 1, 2, \dots$ ) за время  $\Delta u$  на отрезке береговой линии<sup>1</sup>  $\Delta l$  определяется только величинами временного интервала и отрезка

$$p_1(\Delta l, \Delta u) = \lambda \Delta l, \Delta u + o(\Delta l \Delta u),$$

$$p_k(\Delta l, \Delta u) = o(\Delta l \Delta u), k > 1,$$

где  $\lambda$  – параметр, отвечающий среднему числу термоцирков, формирующихся за единицу времени на единицу длины береговой линии;

- размеры возникающего термоцирка не зависят от места его появления на участке и имеют постоянное вероятностное распределение  $F_0(x)$ , не зависящее от времени<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> За положение термоцирка условно принято положение точки правой границы его хорды (начальная точка).

<sup>2</sup> Предполагаем, что распределение  $F_0(x)$  и другие распределения в работе имеют конечные среднее и дисперсию.

За размер термоцирка условно принималась длина хорды, замыкающей дугообразную границу термоцирка с прилегающей водораздельной поверхностью. Анализ позволил показать [4], что в этом случае появление новых термоцирков отвечает пуассоновскому случайному процессу, т.е. вероятность появления  $k$  термоцирков на длине  $l$  за время  $u$  дается выражением

$$P_{\mu}(k) = \frac{(\lambda ul)^k}{k!} e^{-\lambda ul}. \quad (1)$$

Методика включала следующие этапы:

- анализ математической модели изменения морфологического строения термоабразионных берегов криолитозоны для решения поставленной задачи,
- эмпирические исследования возникновения и размеров термоцирков в разных физико-географических условиях.

Эмпирические исследования проводились на ряде ключевых участков, расположенных в различных физико-географических и геокриологических условиях. Выбор участков выполнялся с соблюдением требований относительной морфологической однородности участка и однородности физико-географических, прежде всего, геолого-геоморфологических и геокриологических условий, в частности, прямолинейного простиранья береговой линии. Морфологическая однородность анализировалась на базе

материалов космической съемки высокого разрешения и определялась на основании однотипности сочетаний элементов изображения, отражающей однотипность морфологического строения участка соответственно. Однородность геолого-геоморфологических условий анализировалась на базе материалов государственной геологической съемки масштаба 1 : 200 000 с использованием космических снимков.

В итоге было выбрано шесть участков (рис. 2). Участки сложены с поверхности отложениями разного генезиса (морскими, ледниковыми, озерно-ледниковыми, аллювиально-морскими и озерно-аллювиальными), представленными песками, алевритами, гравийно-галечными отложениями, супесями и суглинками с валунами и галькой, а также отложениями алевритово-мелко-тонкопесчаного состава; многолетнемерзлые породы имеют как прерывистое, так и массивно-островное и массивное распространение, более подробно характеристика участков приведена в работе [5].

На участки были получены материалы космической съемки высокого разрешения за два срока с интервалом 33–40 лет. Для анализа морфологических особенностей использованы космические снимки высокого разрешения со спутников WorldView 2 (разрешение 0.5 м/пикс), WorldView 3 (разрешение 0.3 м/пикс), GeoEye 1 (разрешение 0.5 м/пикс), Corona (разрешение 1.2 м/пикс) и ряда других.



Рис. 2. Карта расположения ключевых участков.

На материалах космической съемки были от-дешифрованы бровки склонов, выделены ду-гообразные границы термоцирков, а также про-ведены хорды дуг, для каждого срока съемки было определено число термоцирков. Наконец, на последнем этапе определялся средний размер термоцирков для каждого участка и для каждого срока, и проводился анализ полученных данных. Измерение хорд проводилось с помощью средств геоинформационной системы ArcGIS.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Первой частью решения поставленной зада-чи стало выявление возможности определения количественных значений динамических пара-метров, характеризующих оползневой процесс, с помощью анализа количественных параметров морфологической структуры термоабразионного берега по материалам космической съемки. Про-веденный нами ранее анализ приведенной модели показал [3], что может быть решена задача оценки динамики распределения размеров термоцирков. Она решалась в ряд этапов:

– получение уравнения изменения вероятност-ного распределения размера термоцирка (длины хорды его дуги) во времени выполнялось на ос-нове рассмотрения различных пространственных соотношений формирующегося и существующих оползней

$$\frac{1}{\lambda} \frac{\partial F(x, u)}{\partial u} = \int_0^x y f(y, u) dy + 2x[1 - F(x, u)] + | + F_0(x)h(u) - 2F(x, u)h(u),$$

где  $F_0(x)$ ,  $F(x, u)$ ,  $f(x, u)$ ,  $h(u)$  распределение разме-ров формирующихся термоцирков, распределение и плотность распределения размеров термоцир-ков в момент  $u$ , средний размер термоцирка в мо-мент  $u$  соответственно, с условиями в начальный момент  $F(x, 0) = F_0(x)$  и  $F(0, u) = 0$ ,

– решение полученного уравнения,  
– оценка поведения полученного распределения при большом времени развития.

В итоге были получены следующие выводы [3]:

– существует предельное вероятностное распре-деление размеров термоцирков при большом вре-мени развития – стационарное распределение;  
– получено соотношение предельного распре-деления термоцирков и распределения размеров формирующихся молодых термоцирков (соответ-ственно оползней):

$$F(x) = 1 - \frac{a[1 - F_0(x)]}{2[x + a]} - \frac{a - \int_0^x [1 - F_0(v)] dv}{2[x + a]^2}, \quad (2)$$

где  $a, F_0(x)$  – математическое ожидание (средний размер) и распределение размера формирующихся молодых термоцирков соответственно;

– получено описание изменения среднего размера термоцирков во времени и соотношение среднего предельного размера термоцирков ( $b$ ) и среднего размера формирующихся термоцирков (соответ-ственно оползней)

$$h(u) = \frac{a}{2 - e^{-\lambda au}}, \quad b = \frac{a}{2}, \quad (3)$$

где  $b$  – средний предельный размер термоцирков;

– плотность генерации термоцирков ( $\lambda$ ) не оказы-вает влияния на предельное распределение разме-ров, видимо, влияя только на скорость сходимос-ти к предельному распределению.

Таким образом, полученный результат позво-лил сделать вывод, что, хотя морфологическая структура термоабразионного берега находится в постоянном изменении, тем не менее при значи-тельном времени развития *распределение размеров* термоцирков становится стационарным, соответ-ственно постоянным становится и средний разме-р термоцирков, т.е. морфологическая структура достигает состояния динамического равновесия.

Исследование морфологического строения ключевых участков позволяют частично провер-ить полученные выводы и несколько детализи-ровать их. Анализ полученных результатов пока-зывает, что при повторном измерении среднего размера термоцирков в подавляющем большин-стве случаев должно наблюдаться его уменьшение, а на поздних этапах развития – практическая ста-билизация, конечно, исключая статистические флуктуации. Для экспериментальной проверки этого было исследовано изменение во времени среднего размера термоцирка по материалам по-вторных космических съемок. Результаты пред-ставлены в таблице (табл. 1).

Проведенный анализ данных позволяет заклю-чить, что средние размеры термоцирков находят-ся в интервале 0.027–0.144 км, при этом средние размеры термоцирка на исследованных участках п-ова Канин меньше, чем на любом из участков п-ова Ямал и Гыдан. Видимо, выявленные разли-чия следует объяснить разницей локальных физи-ко-географических, геолого-геоморфологических и геокриологических условий различных участков.

Анализ также показывает (табл. 2), что на трех ключевых участках из шести между сроками съемки средний размер термоцирков уменьша-ется на 0.6–4.8 м за 10 лет. На двух участках на-блюдается стабилизация размера и еще на одном – фиксируется формальное увеличение на 0.3 м за 10 лет, что также можно рассматривать с учетом статистических флуктуаций как практическую стабилизацию. То есть выявленные тенденции на-ходятся в согласии с полученными результатами

**Таблица 1.** Значения средних размеров термоцирков за два срока

Участок	Протяженность участка, км	Срок 1			Срок 2		
		Год съемки	Число термоцирков	Средний размер, км	Год съемки	Число термоцирков	Средний размер, км
КНС-1	10.4	1980	64	0.163	2020	72	0.144
КНС-2	11.8	1980	214	0.055	2013	290	0.041
КНС-3	5.4	1980	165	0.033	2013	176	0.031
КНС-4	11.9	1980	160	0.074	2017	159	0.075
ЯМЛ-1	2.9	1982	109	0.027	2019	108	0.027
ГДН-2	8.6	1979	298	0.029	2016	319	0.027

и подтверждают развиваемые представления о динамическом равновесии.

Таким образом на участках ЯМЛ-1 и ГДН-2 логично ожидать, что наблюдаемое распределение будет близко к предельному распределению размеров термоцирков. На этих участках было выполнено построение статистических распределений размеров термоцирков. Близкое к стационарному распределение размеров термоцирков представлено на рис. 3.

Возможные трудности анализа связаны с неоднозначностью выделения хорд малых размеров, в силу чего, по сути дела, мы имеем дело с усеченными распределениями. На эту неоднозначность и сложность косвенно указывают известные данные о зависимости числа выделяемых неровностей береговой линии от шага измерений, которые привели в свое время к возникновению представлений о фрактальности [8].

Используем сформулированные представления о динамическом равновесии термоабразионных берегов и полученное выражение (2) для решения

поставленной задачи. Дифференцируя его, получаем предельную плотность распределения размеров термоцирков:

$$\frac{dF(x)}{dx} = \frac{a}{2} \frac{dF_0(x)}{dx} \frac{1}{[x+a]} + a \frac{1-F_0(x)}{[x+a]^2} + a - \int_0^x [1-F_0(v)]dv + a \frac{0}{[x+a]^3} \tag{4}$$

Из выражения (2) следует равенство

$$a \frac{[1-F_0(x)]}{[x+a]} + a \frac{0}{[x+a]^2} = 2[1-F(x)] \tag{5}$$

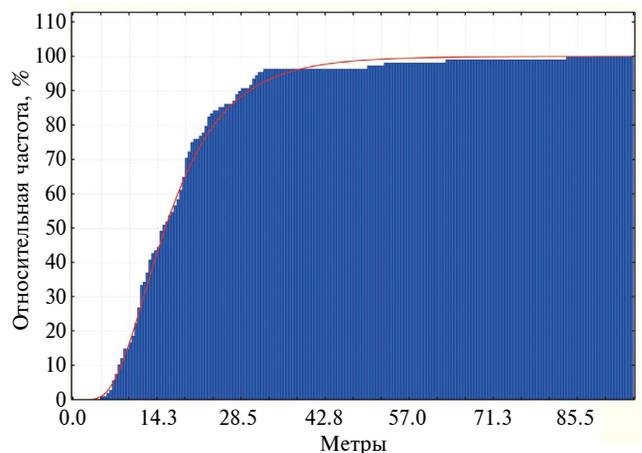
подставляя в (4) и выделяя плотность вероятности формирующихся оползней, получаем

$$\frac{dF_0(x)}{dx} = 2 \frac{dF(x)}{dx} \frac{[x+a]}{a} - 4 \frac{[1-F(x)]}{a} \tag{5}$$

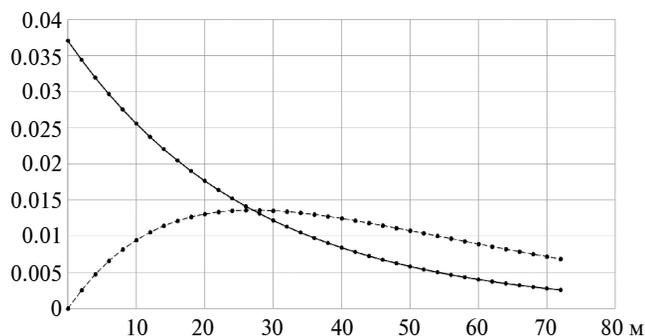
Наконец, интегрируя, используя (3) и упрощая, получаем выражение для вероятностного

**Таблица 2.** Скорость изменения средних размеров термоцирков

Участок	Интервал между съемками, лет	Скорость изменения среднего размера, м/10 лет
КНС-1	40	-4.8
КНС-2	33	-4.2
КНС-3	33	-0.6
КНС-4	37	0.3
ЯМЛ-1	37	0.0
ГДН-2	37	0.0



**Рис. 3.** Пример распределения размеров термоцирков на участке п-ва Ямал (синий контур — эмпирическое распределение, красная линия — логнормальное распределение).



**Рис. 4.** Примеры графиков наблюдаемой плотности распределения размеров термоцирков (сплошная) и плотности распределения размеров формирующихся молодых термоцирков (пунктирная) (пояснения в тексте).

распределения размеров формирующихся молодых термоцирков (соответственно оползней)

$$F_0(x) = 2F(x) - x \frac{[1 - F(x)]}{b} - \int_0^x \frac{[1 - F(u)]}{b} du.$$

Таким образом, получено выражение, дающее принципиальную возможность по наблюдаемой на снимке морфологической структуре с помощью анализа наблюдаемого распределения размеров термоцирков определить вероятностное распределение формирующихся молодых оползней.

Приведем пример использования данного решения. Пусть распределение наблюдаемых размеров термоцирков отвечает экспоненциальному закону с плотностью распределения

$$f(x) = \mu e^{-\mu x},$$

соответственно, со средним

$$M\xi = \frac{1}{\mu},$$

где  $\mu$  – параметр распределения.

Оценим распределение размеров формирующихся молодых термоцирков, необходимое для прогноза развития процессов на береговой линии. Подставляя в (5) и упрощая, получаем плотность распределения размеров формирующихся термоцирков

$$f_0(x) = \mu^2 x e^{-\mu x}.$$

Иначе говоря, в этом случае распределение размеров формирующихся молодых термоцирков отвечает гамма-распределению. Графики плотности распределения наблюдаемого распределения размеров и распределения размеров формирующихся молодых термоцирков приведены на рис. 4.

Трудности численной реализации обоснованного подхода могут быть связаны с выделением хорд малых размеров, в силу чего, по сути, как было отмечено выше, исследователь имеет дело с усеченными распределениями.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы.

Морфологическая структура ландшафта термоабразионных берегов криолитозоны в однородных физико-географических условиях и при относительном постоянстве климатических условий находится в состоянии динамического равновесия.

Получено выражение, дающее принципиальную возможность по наблюдаемой на материалах однократной космической съемки морфологической структуре термоабразионных берегов определить без стационарных наблюдений вероятностное распределение размеров формирующихся молодых термоцирков (соответственно, оползней).

Плотность генерации формирующихся термоцирков (соответственно, оползней) не определяется по морфологической структуре термоабразионных берегов.

Результат исследования может быть использован при прогнозе отступления береговой линии и прогнозе оползневых процессов на термоабразионных берегах криолитозоны.

*Исследование выполнено в рамках госзадания по теме НИР № FMWM-2022-0010.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белова Н.Г., Шабанова Н.Н., Огородов С.А., Камалов А.М. и др. Динамика термоабразионных берегов Карского моря в районе мыса Харасавэй (Западный Ямал) // Криосфера Земли. 2017. Т. 21. № 6. С. 85–96.
2. Васильев А.А., Покровский С.И., Шур Ю.Л. Динамика термоабразионных берегов западного Ямала // Криосфера Земли. 2001. С. 44–52.
3. Викторов А.С. Исследование закономерностей динамики морфологической структуры абразионных берегов криолитозоны на основе комплексирования математического моделирования и космической съемки // Исследование Земли из космоса. 2024. (в печати)
4. Викторов А.С. Моделирование морфологических особенностей берегов с развитием оползневых процессов // Геоэкология. 2022. № 6. С. 28–36.
5. Викторов А.С., Орлов Т.В., Архипова М.В., Капралова В.Н., Бондарь В.В. Количественные закономерности морфологического строения абразионных берегов с развитием оползневых процессов в пределах криолитозоны (на примере побережья полуостровов Канин нос и Ямал) // Геоморфология. 2023. Т. 54. № 3. С. 124–137.

6. Викторов С.В., Илюшина М.Т., Кузьмина И.В. Эколого-генетические ряды растительных сообществ как индикаторы природных процессов // Экология. 1970. № 6. С. 88–94.
7. Кизяков А.И. Динамика термоденудационных процессов на побережье Югорского полуострова // Криосфера Земли. 2005. Т. IX. № 1. С. 63–67.
8. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы. М.: Институт компьютерных исследований, 2002. 656 с.
9. Новиков В.Н., Федорова Е.В. Разрушение берегов в юго-восточной части Баренцева моря // Вестник Московского университета. Сер. 5: география. 1989. № 1. С. 64–68.
10. Совершаев В.А. Криогенные процессы и явления на побережье и шельфе арктических морей // Динамика арктических побережий России. М.: Изд-во МГУ, 1998. С. 12–18.
11. Хомутов А.В., Лейбман М.О. Ландшафтные факторы изменения скорости термоденудации на побережье Югорского полуострова // Криосфера Земли. 2008. Т. XII. № 4. С. 24–35.
12. Aleksyutina D.M., Shabanova N.N., Kokin O.V. et al. Monitoring and modelling issues of the thermoabrasive coastal dynamics // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2018. № 193. No. 012003.
13. Belova N.G., Novikova A.V., Günther F., Shabanova N.N. Spatiotemporal variability of coastal retreat rates at Western Yamal Peninsula, Russia, based on remotely sensed data // J. of Coastal Research. 2020. № 95. P. 367–371.
14. Leibman M., Kizyakov A., Zhdanova Y. et al. Coastal Retreat Due to Thermodenudation on the Yugorsky Peninsula, Russia during the Last Decade, Update since 2001–2010 // Remote Sensing. 2021. 13. 4042. P. 21. <https://doi.org/10.3390/rs13204042>

## POSSIBILITY OF QUANTITATIVE DETERMINATION OF DYNAMIC PARAMETERS OF LANDSLIDE PROCESSES FOR THERMOABRASION SHORES IN CRYOLITHOZONE BASED ON MORPHOLOGICAL PATTERN ANALYSIS BY SINGLE SPACE IMAGERY

A. S. Victorov<sup>a, #</sup>

<sup>a</sup>*Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences,  
Ulansky per. 13, bld.2, Moscow, 101000 Russia*

<sup>#</sup>*E-mail: vic\_as@mail.ru*

The purpose of this study is to investigate the possibility of quantifying the dynamic parameters of landslide processes of abrasion shores in the cryolithozone by analyzing the morphological pattern of these shores taken from a single space survey. The empirical study was carried out at six key sites within the Kanin Nose, Gydan, and Yamal peninsulas. As follows from the analysis, the probability distribution of the thermocircus sizes observed at each moment differs from that of young thermocircuses (and, respectively, landslides) formed due to the erasure of a part of a thermocircus or its complete erasure in the process of the coastal development. The results of the mathematical modeling show that in the case of an abrasion slope with relatively homogeneous geological and geocryological characteristics, a dynamic balance is achieved, which is manifested in the stabilization of the average size of thermocircuses and stabilization of the probability distribution of their sizes along the slope extension. The analysis of empirical data at the studied key sites showed that the observed trends in the average size of the thermocircuses correspond to the conclusion about the existence of the dynamic balance in the development of the coastal morphologic pattern. The study's main result is the analytical dependence, which gives a principal possibility to determine the probability distribution of the sizes of young landslides based on the morphological pattern of abrasion shores observed from the single space survey without stationary observations. The morphological pattern of abrasion shores does not determine the generation density of forming landslides. The result of the study can be used in forecasting shoreline retreat and predicting landslide processes on abrasion shores of the cryolithozone.

**Keywords:** *mathematical modeling of morphological features of landslides, abrasion shores, mathematical morphology of landscapes, dynamic balance of morphological patterns*

### REFERENCES

1. Belova, N.G., Shabanova, N.N., Ogorodov, S.A., Kamalov, A.M. et.al. [Dynamics of thermal abrasion coasts of the Kara Sea in the area of Cape Kharasavey (Western Yamal)]. *Kriosfera Zemli*, 2017, vol. 21, no. 6, pp. 85–96. (in Russian)
2. Vasil'ev, A.A., Pokrovskii, S.I., Shur, Yu.L. [Dynamics of thermal abrasion shores of the western Yamal]. *Kriosfera Zemli*, 2001, vol. V, no. 1, pp. 44–52. (in Russian)
3. Victorov, A.S. [Research of regularities of morphological pattern dynamics for abrasion shores of cryolithozone on the basis of complexing mathematical modeling and space imagery]. *Issledovaniye Zemli iz kosmosa*, 2024, no. pp. (in Russian)
4. Victorov, A.S. [Modeling morphological features of abrasion landslide coasts in the cryolithozone]. *Geoekologiya*, 2022, no. 6, pp. 28–36. (in Russian)
5. Victorov, A.S., Orlov, T.V., Arkhipova, M.V., Kapralova, V.N., Bondar, V.V. [Quantitative laws of a morphological pattern for abrasion slopes with a landslide process within the cryolithozone (by the example of the Kanin and Yamal Peninsula coasts)]. *Geomorfologiya*

- i paleogeografiya*, 2023, vol. 54, no. 3, pp. 124–137. (in Russian)
6. Viktorov, S.V., Ilyushina, M.T., Kuz'mina, I.V. [Ecological and genetic series of plant communities as indicators of natural processes]. *Ekologiya*, 1970, no. 6, pp. 88–94. (in Russian)
  7. Kizyakov, A.I. [The dynamics of thermodenudation processes at the Yugorsky Peninsula coast]. *Kriosfera Zemli*, 2005, vol. IX, no. 1, pp. 63–67. (in Russian)
  8. Mandel'brot, B. [Fractal geometry of nature]. Moscow, Institute of Computer Research Publ., 2002, 656 p. (in Russian)
  9. Novikov, V.N., Fedorova, Ye.V. [Coastal destruction in the southeastern part of the Barents Sea]. *Vestnik Moskovskogo universiteta, Ser. 5: geografiya*, 1989, no. 1, pp. 64–68. (in Russian)
  10. Sovershayev, V.A. [Dynamics of the Arctic coasts of Russia]. Moscow, MGU Publ., 1998, pp. 12–18. (in Russian)
  11. Khomutov, A.V., Leibman, M.O. [Landscape controls of thermodenudation rate change on Yugorsky Peninsula coast]. *Kriosfera Zemli*, 2008, vol. XII, no. 4, pp. 24–35. (in Russian)
  12. Aleksyutina, D.M., Shabanova, N.N., Kokin, O.V., Ver gun, A.P. et al. Monitoring and modeling issues of the thermoabrasive coastal dynamics. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2018, no. 193, paper 012003. .
  13. Belova, N.G., Novikova, A.V., Günther, F., Shabanova, N.N. Spatiotemporal variability of coastal retreat rates at Western Yamal Peninsula, Russia, based on remotely sensed data. *J. of Coastal Research*, 2020, no. 95, pp. 367–371.
  14. Leibman, M., Kizyakov, A., Zhdanova, Y. et al. Coastal retreat due to thermodenudation on the Yugorsky Peninsula, Russia during the last decade, update since 2001–2010. *Remote Sensing*, 2021, 13:4042, pp. 21. <https://doi.org/10.3390/rs13204042>