

УДК 551.435.31(268.45+268.45)

КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ МОРФОЛОГИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ АБРАЗИОННЫХ БЕРЕГОВ С РАЗВИТИЕМ ОПОЛЗНЕВЫХ ПРОЦЕССОВ В ПРЕДЕЛАХ КРИОЛИТОЗОНЫ (НА ПРИМЕРЕ ПОБЕРЕЖИЙ ПОЛУОСТРОВОВ КАНИН И ЯМАЛ)[#]

© 2023 г. А. С. Викторов^{1,*}, Т. В. Орлов¹, М. В. Архипова¹, В. Н. Капралова¹, В. В. Бондарь¹

¹Институт геоэкологии имени Е.М. Сергеева РАН, Москва, Россия

*E-mail: dist@geoenv.ru

Поступила в редакцию 21.10.2022 г.

После доработки 28.12.2022 г.

Принята к публикации 14.03.2023 г.

Оползневые процессы берегов криолитозоны занимают особое место в изучении и мониторинге процессов в условиях вечной мерзлоты под влиянием изменения климата, однако морфологии и количественным характеристикам оползней уделено не так много внимания. Целью работы явилось изучение количественных закономерностей абразионных берегов с развитием оползневых процессов побережья криолитозоны, прежде всего, на контакте с прилегающей водораздельной поверхностью. Изучение проведено на основе дешифрирования материалов космической съемки высокого разрешения на примере пяти участков береговой линии полуостровов Канин и Ямал. Исследование было сосредоточено на морфологических особенностях верхней части оползней, на границе с прилегающей водораздельной поверхностью. Граница представляет собой сочетание дугообразных элементов, также местами на склоне наблюдаются дугообразные остаточные участки водораздельной поверхности, отвечающие различным стадиям оползания. По снимкам анализировалась береговая линия и определялись такие характеристики оползней, связанные, прежде всего, с физико-механическими характеристиками отложений, как длина дуг, формирующих границу, длина хорд дуг, стрелки дуг, средние радиусы кривизны, центральные углы дуг, углы ориентировки хорд по отношению к вектору общего простирания соответствующего участка береговой линии. Часть характеристик была получена при дешифрировании прямым измерением, другая часть — вычислением. Анализ охватил 30 выборок объемом 103–183 элемента. Статистическая обработка с использованием критерия согласия Пирсона показала, что на подавляющем большинстве участков распределение размеров дуг верхней границы оползней, хорд, стрелок дуг и радиусов кривизны, а также центральных углов отвечает логнормальному распределению. Ориентировка хорд по отношению к простиранию участка подчиняется нормальному распределению. Значения параметров распределений исследованных количественных характеристик морфологических особенностей оползней отличаются и зависят от физико-географических и инженерно-геокриологических условий конкретных участков. Одним из направлений использования полученных результатов может быть более совершенное моделирование процесса отступления берегов.

Ключевые слова: математическая морфология, многолетнемерзлые породы, оползневые процессы, дешифрирование космических снимков

DOI: 10.31857/S294917892303012X, **EDN:** WETHFU

ВВЕДЕНИЕ

Одну из актуальных научных и практических задач представляет собой исследование оползневых

процессов, и одним из наиболее своеобразных и интересных их видов являются оползневые процессы на абразионных берегах в криолитозоне. Их изучению посвящен целый ряд исследований.

Еще в 1980-х гг. Ф. Арэ (1980) был предложен метод оценки скорости отступления термоабразионных берегов по вертикальным морфометрическим характеристикам береговых уступов. По космическим снимкам был выполнен мониторинг экзогенной геодинамики малых островов арктических морей (Пижанкова, 2022), и была

[#] Ссылка для цитирования: Викторов А.С., Орлов Т.В., Архипова М.В. и др. (2023). Количественные закономерности морфологического строения абразионных берегов с развитием оползневых процессов в пределах криолитозоны (на примере побережий полуостровов Канин и Ямал) // Геоморфология и палеогеография. Т. 54. № 3. С. 124–137. <https://doi.org/10.31857/S294917892303012X>; <https://elibrary.ru/WETHFU>

получена закономерность, что отступающие берега расположены на западных побережьях, а нарастающие — на восточных. В ряде исследований показано, что прослеживается связь активизации процессов с потеплением климата (Хомутов и др., 2015), так, после аномально теплого весенне-летнего сезона 2012 г. на центральном Ямале произошло оттаивание верхней части сильнольдистых многолетнемерзлых пород и пластовых льдов, что спровоцировало сход криогенных оползней течения и дальнейшее развитие термоцирков. Получены качественные и количественные характеристики изменчивости динамики берегов под влиянием изменения климата и техногенных нарушений (Алексютина и др., 2020). Были определены количественные параметры отступления берегов Ляховских о-вов за 50 лет, проведена типизация разрушений берегов (Пижанкова, Добрынина 2010; Пижанкова 2011), авторами было установлено, что скорости отступления могут достигать 2.5 м/год. А.В. Новиковой (2022) были установлены максимальные среднегодовые скорости отступления берегов на о-ве Белый (1.9 м/год) и берегов Байдарацкой губы (1.2 м/год) и выявлена тенденция к усилению термоабразионных процессов с 2000-х гг. Максимальные скорости отступления наблюдались на береговых участках, сложенных высокольдистыми суглинистыми отложениями с выходами подземных льдов и подвергающихся интенсивному воздействию термоабразии (Белова и др., 2017). А.А. Маслаковым (2019) выявлен рост скоростей отступления берегов до 4.2 м/год за последнее десятилетие в регионах Берингова и Чукотского морей. На о-ве Ушакова скорость отступления берегов возросла до 27.8 м/год, площадь острова уменьшилась на 230 га/год (Романенко и др., 2021). Изучались распределения термоцирков по экспозиции склонов на п-овах Ямал и Гыданский (Нестерова и др., 2021); было показано с одной стороны неслучайное распределение положения термоцирков по склонам разной экспозиции, но при этом отсутствие одной явно доминирующей экспозиции. Установлены скорости отступления термоцирков Югорского п-ова (Лейбман и др., 2021) и связь их отступления с климатом (Leibman et al., 2021). В том числе была выявлена низкая корреляция между скоростью отступления каждого термоцирка с летней температурой воздуха, осадками и волновой активностью. В целом для Югорского п-ова активность термоденудации уменьшается во времени с предыдущего десятилетия (2001–2010 гг.) к следующему (2010–2020 гг.) и от 2010 к 2020 г., хотя тренд летнего тепла резко возрастает в том же направлении.

Ф. Гюнтер и соавт. (Günther, 2013) провели мониторинг нескольких ключевых участков берега длиной 70–90 км в море Лаптевых. Сравнивались разновременные наборы ортотрансформированных спутниковых снимков с 1965 по 2011 г., и бы-

ла проанализирована термоденудация вдоль вершины обрыва и термоабразия вдоль дна обрыва. Нормализованный разностный термоэрозионный индекс (NDTI) использовался в качестве показателя для качественного описания относительных долей термоденудации и термоабразии. Этот параметр позволяет учитывать равновесие между термоабразионными и термоденудационными процессами, но он имеет определенные недостатки, которые отмечает автор. Было показано, что среднегодовая скорость отступления на всех трех участках в последние годы была больше 5.3 м/год, это существенно выше, чем в среднем за многолетний период 2.2 м/год. Сходным методом были измерены скорости отступления берега на о-ве Колгуев (Кизяков и др., 2013). Были получены близкие скорости отступления — 2–3 м/год в среднем и до 14 м/год максимально.

При исследовании береговой зоны Карского моря выделены основные морфогенетические типы берегов, преобладающими являются термоабразионные, лайдовые, лагунные и аккумулятивные (Новикова, Огородов, 2021). Изучение влияния морских льдов на динамику рельефа береговой зоны (Огородов, 2011) показывает, что в арктических бассейнах наиболее интенсивные воздействия морских льдов фиксируются в прибрежно-шельфовой зоне морей, подвергающихся напором многолетних дрейфующих льдов. Результаты многолетних наблюдений динамики западного берега Ямала (Васильев и др., 2001) установили, что для процесса разрушения морских берегов характерна внутривековая цикличность с продолжительностью одного цикла в 20 лет, предположительно связанная с особенностями атмосферной циркуляции и океанической гидродинамики. С.А. Огородов и группа исследователей (Огородов и др., 2014) на примере Печорского и Карского морей выявили негативные последствия техногенного влияния на абразию берегов, скорость отступления берегов под воздействием локальных нарушений может увеличиваться в два или три раза.

Выполнен целый ряд широкомасштабных обобщающих исследований. А.И. Кизяков и М.О. Лейбман (2016) провели обзор исследований криогенных процессов за 2010–2015 гг. Создана база литературных и архивных данных об отступании берегов в XX и XXI вв. (Богатова и др., 2021). Группой авторов разработан “Электронный атлас абразионной и ледово-экзарационной опасности прибрежно-шельфовой зоны Российской Арктики” (Огородов и др., 2020), в котором дается как общая информация о механизмах отступления берегов, так и результаты региональных измерений.

В целом различными исследователями были выполнены значительные циклы изучения мор-



Рис. 1. Карта расположения ключевых участков.

Fig. 1. Location map of key sites.

ских берегов криолитозоны, развитых на них термоцирков и комплексов денудационных процессов. Однако большинство работ связано либо с мониторингом процесса отступления берега, либо с измерением скоростей отступления берега, либо с изучением механизмов отступления и их связей с геокриологическими или климатическими факторами. Таким образом, подавляющее большинство исследований посвящено оползневым процессам и развитию термоцирков в контексте изучения скорости и форм отступления берегов, и, соответственно, в работах изучались протяженность оползней и термоцирков и ее изменения в направлении, перпендикулярном береговой линии. При этом недостаточно внимания уделялось другим особенностям морфологического строения оползней, прежде всего количественным особенностям, и присущим им закономерностям.

Кроме того, надо отметить, что часть исследователей по объективным причинам использовали для мониторинга процессов отступления космические снимки низкого пространственного разрешения (10–30 м/пикс), которые позволяют установить величины изменения береговой линии на длительном интервале, но не позволяют судить о плановой и высотной морфологии самих термоцирков.

Целью настоящей работы явилось изучение количественных закономерностей строения абразионных берегов криолитозоны с развитием оползневых процессов, прежде всего, на контакте с прилегающей водораздельной поверхностью, т.е. на бровке берегового уступа.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование было проведено на примере нескольких участков абразионных берегов криолитозоны с развитием оползневых процессов на побережьях п-овов Канин и Ямал (рис. 1). Абразионные берега с развитием оползневых процессов представляют собой сочетание фрагментов оползневых тел разного возраста с наличием обрывистого участка с протеканием интенсивных термоабразионных и термоденудационных процессов, как правило, с формированием термоцирков той или иной морфологии. Местами на склоне наблюдаются дугообразные остаточные участки водораздельной поверхности, отвечающие различным стадиям оползания. Типичный вид представлен на рис. 2.

Методика исследований включала следующие основные элементы:

- выбор ключевых участков и получение материалов космической съемки этих участков;
- дешифрирование и измерение исходных характеристик морфологического строения оползней по материалам космической съемки высокого разрешения;
- определение расчетных характеристик морфологического строения оползней;
- статистическая обработка полученных характеристик морфологического строения оползней;
- анализ полученных результатов.

Выбор ключевых участков был выполнен на основе требований относительной морфологиче-

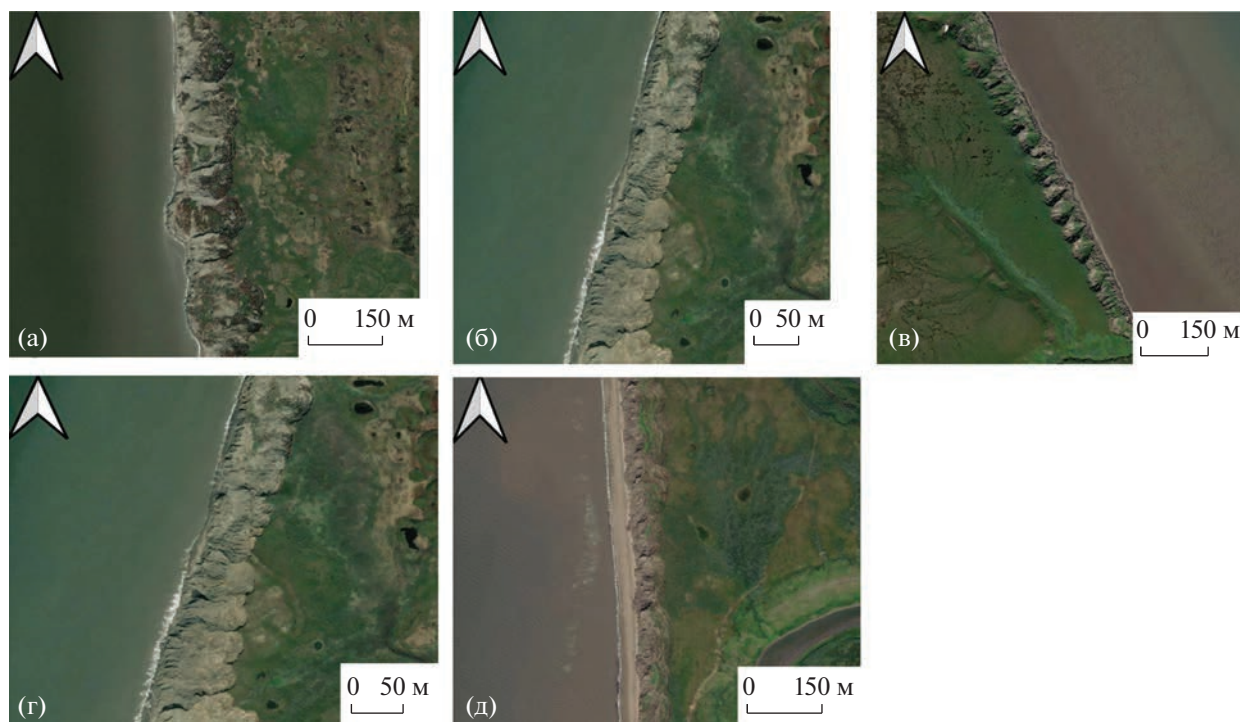


Рис. 2. Фрагменты изображений ключевых участков по материалам космических съемок: (а) – KNS -1, (б) – KNS -2, (в) – KNS -3, (г) – KNS-4, (д) – YML-1.

Fig. 2. Fragments of images of key sites on space imagery materials: (a) – KNS-1 site, (б) – KNS-2 site, (в) – KNS-3 site, (г) – KNS-4 site, (д) – YML-1 site.

ской однородности участка и однородности физико-географических, прежде всего, геолого-геоморфологических условий. Морфологическая однородность анализировалась на основе материалов космической съемки высокого разрешения, и она определялась на основании однотипности сочетаний элементов изображения, отражающих однотипность морфологического строения рассматриваемого участка. Однородность геолого-геоморфологических условий анализировалась на базе материалов государственной геологической съемки, а также с использованием космических снимков. В итоге было выбрано пять участков общей протяженностью 42.5 км, имеющих в целом прямолинейное простираание (рис. 1); более детальная характеристика участков приведена в табл. 1.

На каждый участок были получены материалы космической съемки высокого разрешения, доступные через картографические сервисы Google, Esri. Более подробная характеристика материалов приведена в табл. 2.

Фрагменты изображений ключевых участков на материалах космических съемок приведены на рис. 2.

Исследование, как уже упоминалось выше, было сосредоточено на морфологических особенностях верхней части оползней на границе с прилегающей водораздельной поверхностью —

бровке берегового уступа. Это было сделано в силу меньшей исследованности данных особенностей в более ранних исследованиях (в них, как видно из выполненной характеристики современного состояния исследований, изучению, прежде всего, подвергались поперечные к береговой линии и падению склона размеры оползней и склона в целом), а также в связи с большей четкостью и контрастностью именно этих особенностей на материалах космической съемки, что позволило обеспечить достаточную точность дешифрирования.

Следующим шагом было дешифрирование границы оползней с прилегающей водораздельной поверхностью, отдешифрированная бровка берегового уступа представляла собой систему дугообразных элементов. Далее для выполнения анализа были проведены хорды дуг и выделены сегменты, заключенные между дугами и хордами, а также построены векторы общего простираения участка, соединяющие начало первой дуги и конец последней для каждого участка. Таким образом, исходными измеряемыми характеристиками были приняты:

- длины хорд;
- ориентировка хорд;
- площади сегментов;
- длины дуг.

Таблица 1. Краткая характеристика условий ключевых участков

Table 1. Description of the conditions of key sites

Участок	Местоположение	Среднегодовая темп. пород, °С	Мощность ММП, м	Характеристика участков
KNS-1	Канин мыс	0.5...–2	0–50	Участок сложен примерно в равных долях морскими и ледниковыми отложениями. Морские отложения второй террасы: пески с прослоями алевроитов, глин (до 4.8 м). Ледниковые отложения: диамиктоны (до 20 м), пески, алевроиты с дресвой и щебнем / Аллювиальные отложения первых надпойменных террас и пойм: первые террасы – галечники, пески; поймы – пески, алевроиты, глины (до 2 м). Прерывистое расположение мерзлых пород, полупереходный тип сезонного промерзания и оттаивания (–1...–2).
KNS-2	Канин мыс	1...–1	0–100	Около 70% участка сложено нерасчлененными морскими отложениями. Они представлены как прибрежными песками, гравийно-галечными отложениями, валунно-галечными отложениями, так и более глубоководными глинами. Мощность толщи обычно не превышает 15 м. Перекрыты озерно-ледниковыми отложениями второй ступени. Подстилаются ледниковыми образованиями среднего звена. Отложения содержат характерную для бореальных отложений фауну – <i>Helcion pellucidum</i> , <i>Gibbula tumida</i> , <i>Rissoa membranacea</i> , <i>Spisula elliptica</i> и <i>Panomya arctica</i> . Ледниковые отложения образуют прерывистый маломощный чехол супесей, суглинков с валунами, галькой. Частично перекрыты нерасчлененными верхнеплейстоцен-голоценовыми и голоценовыми отложениями, подстилаются отложениями второй ступени, в районе кряжа – дочетвертичными образованиями. Мощность до 50 м. Массивно-островное расположение мерзлых пород, переходный тип сезонного промерзания и оттаивания (–1...–1).
KNS-3	Канин мыс	1...–1	0–100	Участок сложен ледниковыми отложениями, которые образуют прерывистый маломощный чехол супесей, суглинков с валунами, галькой. Частично перекрыты нерасчлененными верхнеплейстоцен-голоценовыми и голоценовыми отложениями, подстилаются отложениями второй ступени, в районе кряжа – дочетвертичными образованиями. Мощность до 50 м. Массивно-островное расположение мерзлых пород, переходный тип сезонного промерзания и оттаивания (–1...–1).
KNS-4	Канин мыс	0.5...–2	0–50	На 90% сложен аллювиально-морскими отложениями: пески, илы (до 5 м). Аллювиальные отложения первых надпойменных террас и пойм: первые террасы – галечники, пески; поймы – пески, алевроиты, глины (до 2 м). Прерывистое расположение мерзлых пород, полупереходный тип сезонного промерзания и оттаивания (–1...–2).

Таблица 1. Окончание

Участок	Местоположение	Среднегодовая темп. пород, °С	Мощность ММП, м	Характеристика участков
YML1	п-ов Ямал	–7...–9	200–300	Участок расположен на первой террасе, сложен морскими и озерно-аллювиальными отложениями. Для озерно-аллювиальных отложений характерен алевритово-мелко-тонкопесчаный состав, местами с пачками тонкослоистых алевроглин. Морские отложения первой террасы (m ₁ III-IV) верхнеплейстоцен-голоценового возраста представлены желто-бурыми песками, мелко- и среднезернистыми с примесью гравия и гальки с прослоями суглинков и глин. Сплошное распространение ММП, устойчивый тип сезонного промерзания и оттаивания (–5...–10).

Таблица 2. Характеристика использованной спутниковой съемки

Table 2. Characteristics of the used satellite imagery

Участок	Протяженность, км	Характеристика съемки		
		спутник	дата	разрешение, м/пикс
KNS-1	10.4	WorldView 3	18 июля 2020 г.	0.3
KNS-2	11.8	GeoEye 1	10 июня 2013 г.	0.5
KNS-3	5.4	GeoEye 1	10 июня 2013 г.	0.5
KNS-4	11.9	WorldView 2	29 июля 2017 г.	0.5
YML-1	2.9	WorldView 3	20 августа 2019 г.	0.3

Следующим этапом было получение расчетным путем производных характеристик, измерение которых прямым методом затруднительно. Производные характеристики включали следующие величины:

- стрелки дуг;
- средние радиусы кривизны дуг;
- центральные углы;
- угол ориентировки хорды по отношению к вектору общего простираения соответствующего участка береговой линии.

В итоге схема анализируемых характеристик приведена на рис. 3, (а, б).

Как вытекает из решения стандартной геометрической задачи (см. рис. 3), центральный угол α может быть получен как решение (наименьший положительный корень) уравнения

$$\frac{\alpha}{2} - \frac{2S}{h^2} = \frac{1}{2} \sin \alpha - \frac{2S}{h^2} \cos \alpha, \quad (1)$$

где S – площадь сегмента, h – длина хорды. Определение радиуса кривизны после этого производилось на основе соотношения

$$r = \frac{h}{2 \sin \frac{\alpha}{2}},$$

а определение стрелки дуги производилось на основе соотношения

$$b = \frac{h}{2 \sin \frac{\alpha}{2}} \left(1 - \cos \frac{\alpha}{2} \right).$$

Уравнение (1) поддается только численному решению, для осуществления которого был создан специальный программный модуль Arc5 (разработчик П.В. Березин). В итоге для каждого участка и характеристики были получены выборки объемом 108–183 элемента, всего 25 выборок.

Следующим этапом явилась статистическая обработка полученных характеристик морфологического строения оползней. Она включала сопоставление полученных выборок с различными теоретическими распределениями (нормальное, логнормальное, гамма-распределение, экспоненциальное); для выборок углов хорд сопоставление велось только с нормальным распределением, так как в выборке присутствовали отрицательные значения. Сопоставление выполнялось с использованием критерия согласия хи-квадрат



Рис. 3. Схема анализируемых характеристик (а) и их отображение на снимке (б): a — дуга, h — хорда, b — стрелка дуги, α — центральный угол, r — радиус кривизны дуги.

Fig. 3. Scheme of the analyzed characteristics (a) and the example on the satellite image (б): a — arc, h — chord, b — arrow of the arc, α — central angle, r — radius of curvature of the arc.

(критерия Пирсона) в программе Statistica. При этом выполнялись требования методики — объем выборок составлял не менее 50 элементов, и производилось укрупнение интервалов разбиений для того, чтобы в каждом было не менее 5 элементов.

Анализ данных включал сопоставление результатов, полученных для аналогичных характеристик для разных участков, а также анализ взаимосвязей между характеристиками для каждого участка.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты статистической обработки (значения параметров и оценка соответствия различным теоретическим распределениям) по всем участкам приведены в табл. 3.

Основным элементом обработки данных являлось сопоставление полученных выборок значений исследуемых параметров оползневых тел с различными распространенными теоретически-

Таблица 3. Результаты статистической обработки морфологических характеристик оползней
Table 3. Results of statistical processing of morphological characteristics of landslides

Участок	Нормальное распределение			Логнормальное распределение			Гамма-распределение*		
	среднее	стандарт	p^{**}	среднее логарифма	стандарт логарифма	p	λ	β	p
	Хорда, м								
KNS-1	50.3	43.2	0.000	3.675	0.666	0.288	22.66	2.22	0.015
KNS-2	59.6	43.0	0.000	3.881	0.639	0.241	23.18	2.57	0.010
KNS-3	22.8	15.1	0.000	2.951	0.586	0.782	7.63	2.99	0.131
KNS-4	45.6	27.1	0.000	3.678	0.529	0.339	12.40	3.68	0.153
YML-1	18.0	11.3	0.000	2.751	0.504	0.574	4.71	3.81	0.314
	Стрелка, м								
KNS-1	17.2	16.2	0.000	1.839	0.783	0.518	4.96	1.74	0.109
KNS-2	24.4	27.4	0.000	2.097	0.872	0.159	8.83	1.38	0.069
KNS-3	12.1	10.6	0.000	1.505	0.784	0.144	3.28	1.85	0.351
KNS-4	32.9	16.4	0.000	2.683	0.498	0.484	3.74	4.40	0.248
YML-1	13.4	10.5	0.000	1.710	0.599	0.125	2.44	2.75	0.261
	Радиус кривизны дуги, м								
KNS-1	87.6	94.4	0.000	3.449	0.770	0.350	26.34	1.66	0.015
KNS-2	130.5	132.3	0.000	3.839	0.806	0.226	40.19	1.62	0.006
KNS-3	51.6	108.1	0.000	2.698	0.871	0.003	24.81	1.04	0.000
KNS-4	53.4	45.9	0.000	3.084	0.592	0.041	10.10	2.65	0.005
YML-1	16.4	11.7	0.000	1.904	0.618	0.329	3.08	2.66	0.031
	Дуга, м								
KNS-1	56.5	47.6	0.000	3.794	0.665	0.029	25.16	2.24	0.000
KNS-2	71.4	57.1	0.000	4.033	0.671	0.953	31.28	2.28	0.134
KNS-3	58.0	40.3	0.000	3.178	0.606	0.253	10.35	2.80	0.025
KNS-4	124.4	65.0	0.000	4.011	0.488	0.402	14.27	4.36	0.095
YML-1	50.2	33.8	0.000	3.076	0.517	0.362	6.99	3.59	0.115
	Угол хорды, рад								
KNS-1	-0.10	0.37	0.024	—	—	—	—	—	—
KNS-2	-0.02	0.43	0.233	—	—	—	—	—	—
KNS-3	0.01	0.70	0.017	—	—	—	—	—	—
KNS-4	0.04	0.43	0.402	—	—	—	—	—	—
YML-1	0.08	0.52	0.121	—	—	—	—	—	—
	Центральный угол оползня, рад								
KNS-1	1.31	0.58	0.002	-0.521	0.463	0.628	0.13	5.15	0.713
KNS-2	1.38	0.69	0.002	-0.500	0.531	0.317	0.17	4.04	0.491
KNS-3	2.08	1.18	0.008	-0.164	0.718	0.019	0.39	2.63	0.321
KNS-4	2.52	0.58	0.009	0.199	0.259	0.001	0.08	16.69	0.002
YML-1	2.43	0.67	0.461	0.154	0.295	0.134	0.10	12.50	0.310

Примечание. * — λ — масштабный параметр, β — параметр формы; ** — p — параметр, характеризующий сходство распределений (разница эмпирического и теоретического распределений статистически значима на уровне 0.99 в случае $p < 0.01$).

ми распределениями. Сопоставление распределения длин хорд показывает, что на всех участках на уровне значимости 0.99 наблюдается один и тот же тип распределения — логнормальное распределение. Это выполняется при существенной дифференциации значений параметров распределения для разных участков. Нормальное распределение не согласуется с эмпирическими данными ни на одном участке. Гамма-распределение также соответствует эмпирическим данным, но несколько хуже.

Аналогичное соответствие логнормальному распределению фиксируется и для распределения стрелок, также, как и гамма-распределению. Нормальное распределение не согласуется с эмпирическими данными также ни на одном участке.

Распределение радиусов кривизны также демонстрирует на всех участках соответствие логнормальному распределению. Однако в этом случае выборки не согласуются ни с гамма-распределением, ни с нормальным распределением.

Распределение ориентировки хорд (углы хорд) согласуется с нормальным распределением на всех участках. В отличие от этого центральные углы оползней не отвечают нормальному распределению ни на одном участке, но наблюдается значительное сходство с логнормальным распределением и гамма-распределением на всех участках, кроме KNS-4.

На рис. 4 показаны примеры соответствия эмпирических и теоретических (логнормальных, а для углов хорд — нормальных) распределений различных количественных характеристик.

Таким образом, проведенный анализ позволяет сделать вывод, что между морфологическими особенностями различных участков абразионных берегов с развитием оползневых процессов существует определенная общность, подтверждающаяся данными по пяти участкам п-овов Канин и Ямал. На всех участках, находящихся в различных физико-географических и инженерно-геокриологических условиях, распределение размеров хорд отвечает логнормальному распределению. Близость к гамма-распределению, по-видимому, объясняется близостью самих распределений в определенном интервале значений параметров, это отмечалось и в более ранних работах (Пузаченко, 2014).

Был также выполнен дополнительный анализ средних значений исследованных параметров по полученным выборкам. Анализ данных по хорде оползневых дуг показывает довольно существенную дифференциацию средних значений на различных ключевых участках от 18 до 60 м, при этом наименьшее значение приходится на Ямальский участок, на него приходится также и наименьшее значение среднего квадратического отклонения. Стрелки дуг имеют меньшие средние значения от

12 до 24 м, минимальное значение средней длины стрелки приходится на участок KNS-3 (12 м) и близко к нему значение по Ямальскому участку (13 м); также на Ямальский участок приходится наименьшее значение среднего квадратического отклонения (10 м). Анализ радиусов кривизны показывает очень значительный разброс средних для разных участков от 16 до 130 м, при этом минимальные величины приходятся также на Ямальский участок.

По средним значениям центрального угла оползня выделяются две группы участков Ямальский и KNS-4, с одной стороны, и KNS-1 и KNS-2 — с другой; участок KNS-3 занимает промежуточное положение. Как показывают величины средних квадратических отклонений, разница средних между этими двумя группами далеко выходит за пределы случайных отличий. По величине разброса выделяется участок KNS-3; разница остальных участков невелика.

Анализ средних значений углов ориентировки хорд показывает, что они имеют незначительные отличия. Значения разброса углов также мало различаются; несколько отличается участок KNS-3.

Анализ полученных данных позволяет предложить предварительное объяснение полученным закономерностям.

Одной из главных особенностей рассматриваемой ситуации, как показывает анализ, является постоянное стирание в процессе развития новыми появляющимися оползнями каких-то частей уже существующих оползней (и соответствующих термоцирков), или их целиком. Таким образом, подавляющая часть существующих оползней (точнее их фрагментов) образовалась из-за неоднократного сокращения их исходных размеров за счет вновь образующихся оползней. Это можно представить следующей схемой — размер (длина хорд) после k циклов частичных стираний может быть записана как

$$\xi_k = \xi_0 \eta_1 \eta_2 \dots \eta_k,$$

где ξ_0 — начальный размер хорды при возникновении оползня, η_i — доля длины хорды, которая сохраняется после частичного стирания существующей хорды на i -м цикле стирания образующимся новым оползнем.

В этом случае нетрудно видеть, что справедливо соотношение

$$\ln \xi_k = \ln \xi_0 + \ln \eta_1 + \dots + \ln \eta_k.$$

Поскольку стирание в пределах разных временных интервалов происходит независимо, то и сами величины η_i , и их логарифмы являются независимыми. Из этого можно сделать вывод, что полученная величина $\ln \xi_k$, как сумма большого числа независимых случайных величин, согласно широко известному в теории вероятности резуль-

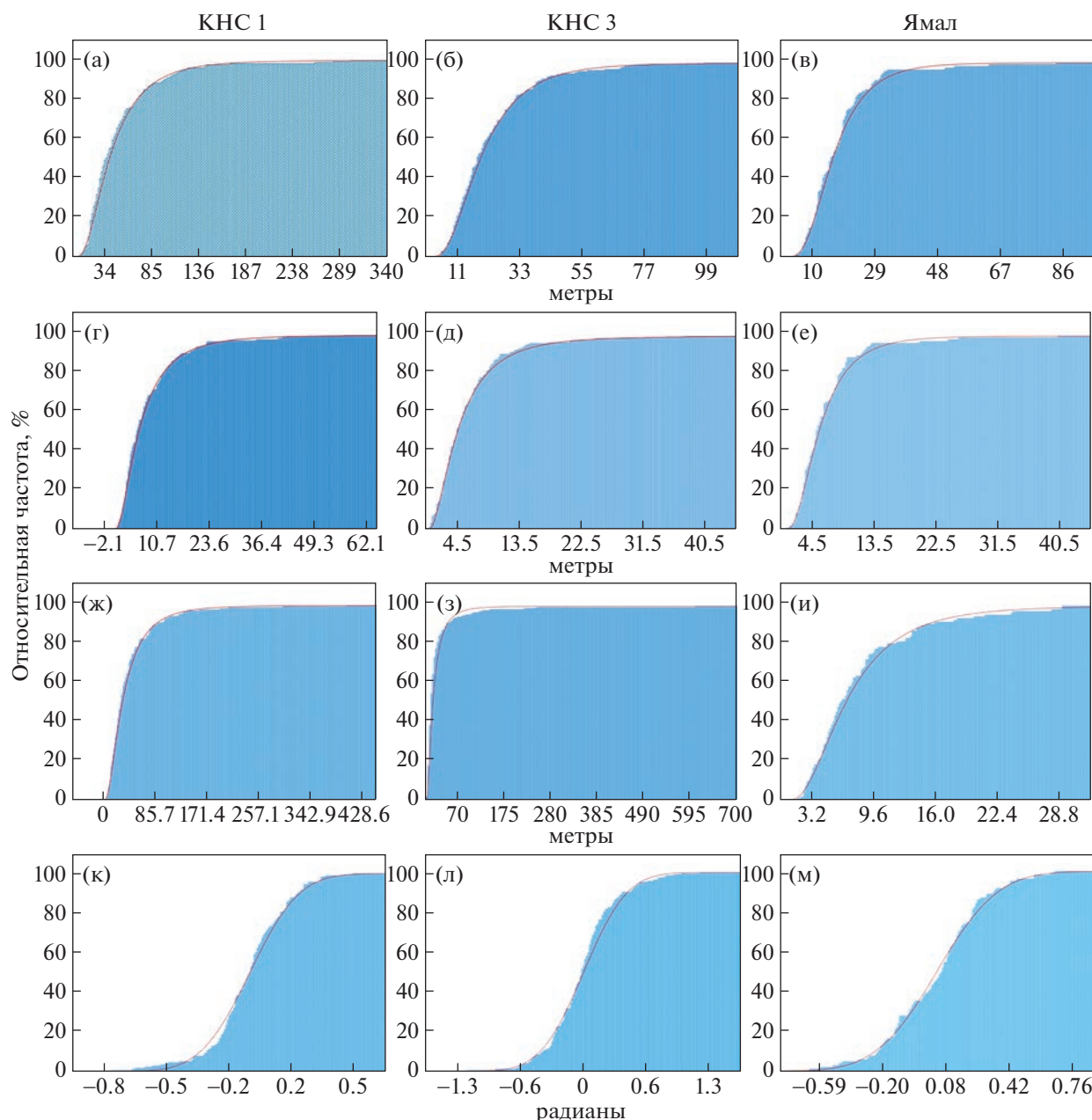


Рис. 4. Примеры соответствия эмпирических и теоретических (логнормальных, а для углов хорд — нормальных) распределений, (а, б, в) — хорд, (г, д, е) — стрелок, (ж, з, и) — радиусов кривизны, (к, л, м) — углов хорд; для участков KNS-1 (а, г, ж, к), KNS-3 (б, д, з, л), YML-1 (в, е, и, м); красная линия — теоретическое распределение.

Fig. 4. Examples of the correspondence between empirical and theoretical (lognormal, and for the angles of chords — normal) distributions, (a, б, в) — chords, (г, д, е) — arrows, (ж, з, и) — curvature radii, (к, л, м) — angles of chords; for sites KNS-1 (а, г, ж, к), KNS-3 (б, д, з, л), YML-1 (в, е, и, м); the red line is the theoretical distribution.

тату (например, (Королюк, Портенко, Скороход и др., 1985)), будет иметь распределение, близкое к нормальному. Это означает, что сам размер хорды ξ_k должен отвечать логнормальному распределению. Предложенное предварительное объяснение отвечает одному из известных вариантов возникновения логнормального закона распределения, получившему название “схема деления”.

Нормальное распределение углов между направлением хорд и общим направлением берега может быть объяснено одновременным действием большого числа факторов без преобладания какого-то одного; в физическом отношении эти факторы отвечают колебаниям энергии термоабразионного воздействия, пространственному варьированию состава отложений, их льдистости, и других характеристик. В основе объяснения ле-

Таблица 4. Оценка корреляционных взаимосвязей между характеристиками морфологических особенностей оползней**Table 4.** Assessment of correlation relationships between the characteristics of the morphological features of landslides

Участок	Местоположение	Характеристики		
		хорда-стрелка	хорда-радиус	хорда-дуга
KNS-1	Канин Нос	0.73	0.87	0.99
KNS-2	Канин Нос	0.71	0.72	0.96
KNS-3	Канин Нос	0.66	0.46	0.97
KNS-4	Канин Нос	0.74	0.90	0.96
YML-1	Ямал	0.84	0.84	0.95

жит уже упомянутое выше положение теории вероятности, объясняющее возникновение нормального закона распределения при одновременном воздействии большого числа факторов.

Логнормальность распределений длин дуг, стрелок, радиусов кривизны может быть объяснена тесной корреляцией их величин с размерами хорды (табл. 4). Анализ коэффициента корреляции показывает, что на всех участках между хордой и стрелкой отмечается сильная корреляционная зависимость. Между хордой и радиусом кривизны сильная зависимость отмечается на четырех участках и на одном (KNS-3) – средняя. Наибольшая величина коэффициента корреляции характерна для связи длины хорд и дуг. Таким образом, если распределение хорд подчиняется логнормальному распределению, то следует ожидать аналогичного вида распределения и для стрелки, и для радиуса кривизны, и для дуг, что и наблюдается.

Анализ средних значений исследуемых параметров показывает, что по большинству параметров отличается Ямальский участок; для него часто характерны наименьшие средние значения (хорд, стрелок, дуг, радиусов кривизны). При этом на рассматриваемом участке не отмечается резких отличий по составу отложений от других участков. Анализ геологических и геокриологических условий позволяет сделать предположение, что подобные отличия средних значений исследуемых параметров могут быть связаны с характером развития многолетнемерзлых пород и их температурой. Для Ямальского участка в отличие от всех остальных характерны сплошное развитие многолетнемерзлых пород и наименьшая среди всех участков температура пород ($-5...-10^{\circ}$). Представляется вероятным, что подобные геокриологические особенности повлияли на прочностные и другие физико-механические характеристики пород, а также на характер оттаивания таким образом, что привели к формированию оползней относительно меньшего размера; что

проявилось в средних размерах и хорд, и стрелок, и дуг, и радиусов кривизны. Это косвенно согласуется с данными, полученными в ранее выполненных исследованиях, о том, что на параметры процесса отступления берега влияет индекс оттаивания (Leibman et al., 2021).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Между морфологическими особенностями различных участков абразионных берегов криолитозоны с развитием оползневых процессов существует определенная общность – на большинстве участков, внутренне однородных по условиям и морфологическим особенностям, но находящихся в различных физико-географических и инженерно-геокриологических условиях, распределение размеров хорд верхней границы оползней, стрелок, дуг и радиусов кривизны, а также центральных углов отвечает логнормальному распределению.

Характер закона распределения можно предположительно объяснить неоднократным частичным стиранием существующих оползней вновь образующимися оползнями.

Ориентировка хорд по отношению к простиранию участка подчиняется нормальному распределению.

Значения параметров распределений исследованных количественных характеристик морфологических особенностей оползней дифференцированы по участкам и зависят от физико-географических и инженерно-геокриологических условий конкретных участков.

Очертания бровки берегового уступа при моделировании отступления, видимо, можно рассматривать как ломаную со случайным нормально распределенным направлением звеньев (хорд) и логнормальным распределением длин хорд, на которых сформированы дуги, ограничивающие сверху оползневые тела.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при поддержке гранта РНФ № 18-17-00226П.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексютина Д.М., Бадина С.В., Баранская А.В. и др. (2020). Термоабразия морских берегов российской Арктики: риски нефтегазового освоения // Освоение ресурсов нефти и газа российского шельфа: Арктика и Дальний Восток (ROOGD-2020) / Тезисы докладов. М.: Газпром ВНИИГАЗ. С. 32.
- Арэ Ф.Э. (1980). Термоабразия морских берегов. М.: Наука. С. 160.
- Белова Н.Г., Шабанова Н.Н., Огородов С.А. и др. (2017). Динамика термоабразионных берегов Карского моря в районе мыса Харасавэй (Западный Ямал) // Криосфера Земли. Т. XXI. № 6. С. 85–96. [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2017-6\(85-96\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2017-6(85-96))
- Васильев А.А., Покровский С.И., Шур Ю.Л. (2001). Динамика термоабразионных берегов западного Ямала // Криосфера Земли. Т. V. № 1. С. 44–52.
- Кизяков А.И., Лейбман М.О. (2016). Рельефообразующие криогенные процессы: обзор литературы за 2010–2015 годы // Криосфера Земли. Т. XX. 4. С. 45–58. [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2016-4\(45-58\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2016-4(45-58))
- Кизяков И.А., Зимин М.В., Лейбман М.О. и др. (2013). Мониторинг скорости термоденудации и термоабразии на западном побережье острова Колгуев с использованием материалов космической съемки высокого разрешения // Криосфера Земли. Т. XVII. № 4. С. 36–47.
- Королюк В.С., Портенко Н.И., Скороход А.В. и др. (1985). Справочник по теории вероятности и математической статистике. М.: Наука. С. 640.
- Лейбман М.О., Кизяков А.И., Жданова Е.Ю. и др. (2021). Отступление берегов Югорского полуострова в результате термоденудации за 2010–2020 и 2001–2010 годы // Современные исследования трансформации криосферы и вопросы геотехнической безопасности сооружений в Арктике. Салехард: Правительство Ямало-Ненецкого автономного округа, С. 246–249. <https://doi.org/10.7868/9785604610848066>
- Маслаков А.А. (2019). Современная динамика абразионно-термоденудационных берегов Берингова и Чукотского морей // Геодинамические процессы и природные катастрофы. Тезисы докладов III Всероссийской научной конференции с международным участием. Южно-Сахалинск: Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН. С. 146.
- Нестерова Н.Б., Хомутов А.В., Лейбман М.О. и др. (2021). Инвентаризация термоцирков на севере Западной Сибири по данным мозаики спутниковых снимков 2016–2018 годов // Криосфера Земли. Т. XXV. № 6. С. 41–50. <https://doi.org/10.15372/KZ20210604>
- Новикова А.В. (2022). Морфология и динамика термоабразионных берегов Карского моря. Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М.: МГУ. С. 26.
- Новикова А.В., Огородов С.А. (2021). Морфодинамика берегов Карского моря // Закономерности формирования и воздействия морских, атмосферных опасных явлений и катастроф на прибрежную зону РФ в условиях глобальных климатических и промышленных вызовов (“Опасные явления – III”) / Мат-лы III Междунар. науч. конф. Ростов-н/Д: Изд-во ЮНЦ РАН. С. 284–286.
- Огородов С.А. (2011). Роль морских льдов в динамике рельефа береговой зоны. М.: Изд-во Московского университета. С. 173.
- Огородов С.А., Архипов В.В., Баранская А.В. и др. (2014). Техногенный фактор динамики берегов Печорского и Карского морей в условиях изменения климата и ледовитости // Мат-лы XXV Междунар. береговой конф. “Береговая зона – взгляд в будущее”. М.: ГЕОС. С. 114–117.
- Огородов С.А., Баранская А.В., Белова Н.Г. и др. [Электронный ресурс]. URL: <https://rus.arcticcoast.ru/atlas/> (дата обращения 20.12.2022)
- Пижанкова Е.И. (2011). Термоденудация в береговой зоне Ляховских островов (результаты дешифрирования аэрокосмических снимков) // Криосфера Земли. Т. XV. № 3. С. 61–70.
- Пижанкова Е.И., Балдина Е.А., Гаврилов А.В. и др. (2022). Экзогенная геодинамика малых островов арктических морей (по результатам дешифрирования космических снимков) // Сб. докл. Шестой конф. геокриологов России “Мониторинг в криолитозоне” с участием российских и зарубежных ученых, инженеров и специалистов. МГУ имени М.В. Ломоносова, 14–17 июня 2022 г. М.: КДУ, Добросвет. С. 484–491. <https://doi.org/10.31453/kdu.ru.978-5-7913-1231-0-2022-1130>
- Пижанкова Е.И., Добрынина М.С. (2010). Динамика побережья Ляховских островов (результаты дешифрирования аэрокосмических снимков) // Криосфера Земли. Т. XIV. № 4. С. 66–79.
- Пузаченко Ю.Г. (2004). Математические методы в экологических и географических исследованиях. М.: ИЦ Академия. С. 416.
- Романенко Ф.А., Балдина Е.А., Луговой Н.Н. и др. (2021). Динамика берегов островов северной части Карского моря (ст. 1. Остров Ушакова) // Геоморфология. Т. 52. № 3. С. 116–124. <https://doi.org/10.31857/S043542812103010X>
- Термоабразия морских берегов Российской Арктики – НИР [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://istina.msu.ru/projects/119511499/> (дата доступа: 01.09.2022).
- Хомутов А.В., Дворников Ю.А., Лейбман М.О. и др. (2015). Активизация термоденудационных процессов на центральном Ямале под действием климатических изменений и техногенеза // Современные проблемы гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии Евразии / Мат-лы Всерос. конф. с междунар. участием, г. Томск, 23–27 ноября 2015 г. Томск: Изд-во ТПУ. С. 381–384.
- Günther F., Overduin P., Sandakov A. et al. (2013). Short- and long-term thermo-erosion of ice-rich permafrost coasts in the Laptev Sea region // Biogeosciences. No. 10. P. 4297–4318. <https://doi.org/10.5194/bg-10-4297-2013>
- Leibman M., Kizyakov A., Zhdanova Y. et al. (2021). Coastal Retreat Due to Thermodenudation on the Yugorsky Peninsula, Russia during the Last Decade, Update since 2001–2010 // Remote Sensing. Vol. 13. No. 20. 13. 4042. <https://doi.org/10.3390/rs13204042>

QUANTITATIVE LAWS OF A MORPOLOGICAL PATTERN FOR ABRASION SLOPES WITH A LANDSLIDE PROCESS WITHIN THE CRYOLITHOZONE (THE COASTS OF THE KANIN AND YAMAL PENINSULAS AS EXAMPLES)¹

A. S. Victorov^{a, #}, T. V. Orlov^a, M. V. Arkhipova^a, V. N. Kapralova^a, and V. V. Bondar^a

^a*Sergeev Institute of Environmental Geoscience RAS, Moscow, Russia*

[#]*E-mail: dist@geoenv.ru*

Coast landslide processes take a special place in the study and monitoring of processes in permafrost under the climate change, however, not much attention has been paid to the morphology and quantitative characteristics of the landslides. The aim of the work is to reveal quantitative relationships between the abrasion slopes and a landslide process for coasts within the cryolithozone, mainly in contact with the adjacent interfluvies. The research is based on the interpretation of high-resolution space imagery at five costal sites of the Kanin and Yamal peninsulas. The study was focused on the morphological features of the upper part of the landslides at the border with the adjacent interfluvie. This border is a combination of arc elements. Besides, there are arcuate residual sections of the interfluvie surface, corresponding to different stages of landslide process, in some places on the slope. Analysis of the coastline from images gave us such characteristics of landslides as the length of the arcs forming the boundary, the length of the chords of the arcs, the arrows of the arcs, the average radii of curvature, the central angles of the arc, the angles of orientation of the chords with respect to the vector of the general strike of the corresponding section of the coastline. Some of these characteristics were obtained by direct measurement from satellite images, the others by calculation. The analysis included 30 samples with a volume of 103–183 elements. Statistical processing using Pearson's goodness-of-fit test showed that in the vast majority of the sites, the distributions of the landslide upper boundary arc sizes, chords, arc arrows, and curvature radii, as well as central angles, correspond to a lognormal one. The chord orientations with respect to the strike of the site are normally distributed. The values of the distribution parameters of the studied quantitative characteristics of the landslide morphological features differ and depend on the physical-geographical and engineering-geocryological conditions of specific areas.

Keywords: mathematical morphology, permafrost, landslide processes, space imagery interpretation

ACKNOWLEDGMENTS

The research was done with the support of Russian science foundation, grant No. 18-17-00226П.

REFERENCES

- Aleksyutina D.M., Badina S.V., Baranskaya A.V. et al. (2020). Thermal abrasion of the seashores of the Russian Arctic: risks of oil and gas development. *Osvoenie resursov nefi i gaza rossiiskogo shel'fa: Arktika i Dal'nii Vostok (ROOGD-2020): tezisy dokladov*. M.: Gazprom VNIIGAZ (Publ.). P. 32. (in Russ.)
- Are F.E. (1980). *Termoabraziya morskikh beregov* (Thermal abrasion of seashores). M.: Nauka (Publ.). 160 p. (in Russ.)
- Belova N.G., Shabanova N.N., Ogorodov S.A. et al. (2017). Erosion of permafrost coasts of Kara Sea near Kharasavey Cape, Western Yamal. *Earth's Cryosphere*. Vol. XXI. No. 6. P. 73–83. [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2017-6\(85-96\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2017-6(85-96))
- Günther F., Overduin P., Sandakov A. et al. (2013). Short- and long-term thermo-erosion of ice-rich permafrost coasts in the Laptev Sea region. *Biogeosciences*. No. 10. P. 4297–4318. <https://doi.org/10.5194/bg-10-4297-2013>
- Khomutov A.V., Dvornikov Yu.A., Leibman M.O. et al. (2015). Activation of thermal denudation processes in the central Yamal under the influence of climate change and technogenesis. *Sovremennye problemy gidrogeologii, inzhenernoi geologii i gidrogeokologii Evrazii: materialy Vserossiiskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, g. Tomsk, 23–27 noyabrya 2015 g.* Tomsk: TPU (Publ.). P. 381–384. (in Russ.)
- Kizyakov A.I., Leibman M.O. (2016). Criogenic relief-forming processes: a review of 2010–2015 publications. *Earth's Cryosphere*. Vol. XX. No. 4. P. 45–58. [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2016-4\(45-58\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2016-4(45-58))
- Kizyakov A.I., Zimin M.V., Leibman M.O. et al. (2013). Monitoring of the rate of thermal denudation and thermal abrasion on the western coast of Kolguev Island, using high resolution satellite images. *Earth's Cryosphere*. Vol. 17. No. 4. P. 36–47. (in Russ.)
- Leibman M., Kizyakov A., Zhdanova Yu. et al. (2021). Coastal Retreat Due to Thermodenudation on the Yugorsky Peninsula, Russia during the Last Decade, Update since 2001–2010. *Remote Sensing*. Vol. 13. No. 20. 13. 4042. <https://doi.org/10.3390/rs13204042>
- Leibman M.O., Kizyakov A.I., Zhdanova E.Yu. et al. (2021). Retreat of the coast of the Yugorsky Peninsula as a result of thermal denudation for 2010–2020 and 2001–2010. *Sovremennye issledovaniya transformatsii kriosfery i voprosy geotekhnicheskoi bezopasnosti sooruzhenii v Arktike*. Salekhard: Pravitel'stvo Yamalo-Ne-

¹ For citation: Victorov A.S., Orlov T.V., Arkhipova M.V. et al. (2023). Quantitative laws of a morpological pattern for abrasion slopes with a landslide process within the cryolithozone (the coasts of the Kanin and Yamal Peninsulas as examples. *Geomorfologiya i paleogeografiya*. Vol. 54. No. 3. P. 124–137. <https://doi.org/10.31857/S294917892303012X>; <https://elibrary.ru/WETHFU>

- netskogo avtonomnogo okruga (Publ.). P. 246–249. <https://doi.org/10.7868/9785604610848066>. (in Russ.)
- Maslov A.A. (2019). Modern dynamics of abrasion-thermal denudation coasts of the Bering and Chukchi Seas. *Geodinamicheskie protsessy i prirodnye katastrofy. Tezisy dokladov III Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem*. Yuzhno-Sakhalinsk: Institut morskoy geologii i geofiziki DVO RAN (Publ.). P. 146. (in Russ.)
- Nesterova N.B., Khomutov A.V., Leibman M.O. et al. (2021). The inventory of retrogressive thaw slumps (thermocirques) in the north of Western Siberia based on 2016–2018 satellite imagery mosaic. *Cryosphere of the Earth*. Vol. XXV. No. 6. P. 41–50. <https://doi.org/10.15372/KZ20210604>
- Novikova A.V. (2022). *Morfologiya i dinamika termoabrazionnykh beregov Karskogo morya* (Morphology and dynamics of thermal abrasion coasts of the Kara Sea). *PhD thesis*. Moscow: MSU (Publ.). 26 p. (in Russ.)
- Novikova A.V., Ogorodov S.A. (2021). Morphodynamics of the coasts of the Kara Sea. *Zakonomernosti formirovaniya i vozdeystviya morskikh, atmosferykh opasnykh yavlenii i katastrof na pribrezhnuyu zonu RF v usloviyakh global'nykh klimaticheskikh i industrial'nykh vyzovov ("Opasnyye yavleniya – III"): materialy III Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii*. Rostov-na-Donu: YUNTS RAN (Publ.). P. 284–286. (in Russ.)
- Ogorodov S.A. (2011). *Rol' morskikh l'dov v dinamike rel'efa beregovoi zony* (The role of sea ice in the dynamics of the coastal zone relief). M.: MSU (Publ.). 173 p.
- Ogorodov S.A., Arkhipov V.V., Baranskaya A.V. et al. (2014). Technogenic factor in the dynamics of the shores of the Pechora and Kara Seas in the context of climate change and ice cover. *Materialy XXV Mezhdunarodnoi beregovoi konferentsii "Beregovaya zona – vzgl'yad v budushchee"*. M.: GEOS (Publ.). P. 114–117. (in Russ.)
- Ogorodov S.A., Baranskaya A.V., Belova N.G. et al. [Electronic data]. Access way: <https://rus.arcticcoast.ru/atlas/> (access date: 12.20.2022). (in Russ.)
- Pizhankova E.I., Baldina E.A., Gavrilov A.V. et al. (2022). Exogenous geodynamics of small islands in the Arctic seas (based on the results of space imagery interpretation). *Sbornik dokladov Shestoi konferentsii geokriologov Rossii "Monitoring v kriolitozone" s uchastiem rossiiskikh i zarubezhnykh uchenykh, inzhenerov i spetsialistov*. MGU imeni M.V. Lomonosova, 14–17 iyunya 2022 g. Moscow: KDU, Dobrosvet (Publ.). P. 484–491. (in Russ.). <https://doi.org/10.31453/kdu.ru.978-5-7913-1231-0-2022-1130>
- Pizhankova E.I. (2011). Thermudenudation in the coastal zone of the Lyakhovsky Islands (interpretation of aerospace images). *Earth's Cryosphere*. Vol. XV. No. 3. P. 61–70. (in Russ.)
- Pizhankova E.I., Dobrynina M.S. (2010). The dynamics of the Lyakhovsky Islands coastline (results of aerospace image interpretation). *Earth's Cryosphere*. Vol. XIV. No. 4. P. 66–79. (in Russ.)
- Puzachenko Yu.G. *Matematicheskie metody v ekologicheskikh i geograficheskikh issledovaniyakh* (Mathematical methods in ecological and geographical research). M.: Izdatel'skii tsentr "Akademiya" (Publ.). 2004. 416 p. (in Russ.)
- Romanenko F.A., Baldina E.A., Lugovoy N.N. et al. (2021). Shoreline Dynamics of the islands of the northern part of the Kara Sea (paper 1. Ushakov Island). *Geomorfologiya*. Vol. 52. No. 3. P. 116–124. (in Russ.). <https://doi.org/10.31857/S043542812103010X>
- Thermal abrasion of seashores Russian Arctic [Electronic data]. Access way: <https://istina.msu.ru/projects/119511499/> (access date: 01.09.2022). (in Russ.)
- Vasiliev A.A., Pokrovsky S.I., Shur Yu.L. (2001). Dynamics of the coastal thermoerosion of Western Yamal. *Earth's Cryosphere*. Vol. V. No. 1. P. 44–52. (in Russ.)