

ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ  
ПРОЦЕССЫ

УДК 528.873

МОДЕЛИРОВАНИЕ МОРФОЛОГИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ  
АБРАЗИОННЫХ БЕРЕГОВ С РАЗВИТИЕМ ОПОЛЗНЕВЫХ ПРОЦЕССОВ  
В КРИОЛИТОЗОНЕ

© 2022 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 10.10.2022 г.

После доработки 18.10.2022 г.

Принята к публикации 20.10.2022 г.

Цель настоящего исследования – анализ поведения количественных морфологических особенностей абразионных берегов с развитием оползневых процессов в криолитозоне и их эмпирическое изучение. Исследование сосредоточено на морфологических особенностях верхней части оползней, характерной особенностью которых являются дуги, ограничивающие оползневое тело на границе с водораздельной поверхностью, и их хорды. Изучение проводилось на пяти ключевых участках полуостровов Канин нос и Ямал. Из проведенного анализа следует, что вероятностное распределение длин хорд, наблюдаемых в каждый момент всей совокупности оползней, отличается от распределения размеров хорд образующихся молодых оползней за счет стирания части оползневых тел или полного стирания оползней. Как показали результаты математического моделирования, в условиях относительного однородного по геологическим и геоэкологическим характеристикам абразионного склона устанавливается динамическое равновесие, которое проявляется в стабилизации средней плотности расположения оползней и стабилизации вероятностного распределения их размеров по простиранию склона. Получена аналитическая зависимость между вероятностным распределением размеров хорд образующихся молодых оползней и вероятностным распределением хорд всех представленных оползней, в том числе частично стертых более поздними оползнями, а также между средней плотностью расположения оползней вдоль береговой линии и параметрами распределения размеров хорд образующихся молодых оползней. Анализ эмпирических данных показал соответствие распределений наблюдаемых длин хорд оползней логнормальному распределению на изученных ключевых участках.

**Ключевые слова:** математическое моделирование морфологических особенностей оползней, абразионные берега, математическая морфология ландшафта, динамическое равновесие берегов

DOI: 10.31857/S0869780922060078

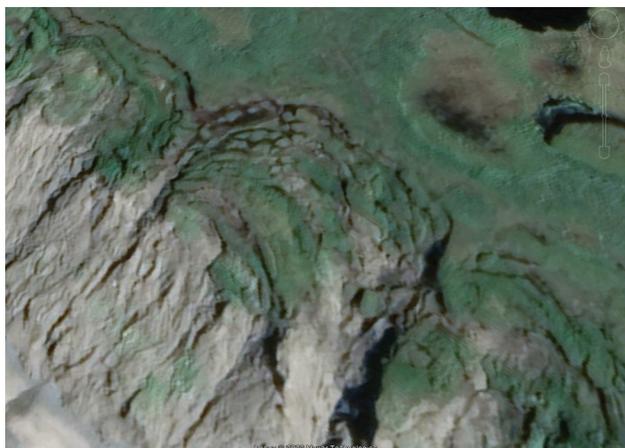
ВВЕДЕНИЕ

Многие исследования посвящены морфологическим особенностям оползней. Обширная группа работ посвящена исследованию этих процессов в связи с отступанием берегов в зоне развития многолетнемерзлых пород [1, 4, 6, 7]. Однако большинство исследований исследуют оползневые процессы в связи с отступанием берегов и, соответственно, изучаются протяженность оползней и изменения в направлении, перпендикулярном береговой линии. В то же время мало внимания уделялось анализу протяженности оползневых тел вдоль бровки склона и ее количественным параметрам.

Цель настоящего исследования – анализ динамики количественных показателей морфологических особенностей абразионных берегов с разви-

тием оползневых процессов в криолитозоне и их эмпирическое изучение.

Исследование проведено на примере нескольких участков абразионных берегов криолитозоны полуостровов Ямал и Канин нос. В их пределах развит комплекс термоабразионных и термоденудационных, в том числе, оползневых, процессов. Рассматриваемые участки представляют собой сочетание циркуобразных фрагментов с развитием оползней разного возраста, как правило, с наличием обрывистого участка в нижней части склона, наиболее подверженного воздействию абразионных процессов. Местами на склоне наблюдаются дугообразные остаточные участки водораздельной поверхности, отвечающие различным стадиям оползания. Нередко на склоне раз-



**Рис. 1.** Типичное изображение абразионных берегов с развитием оползневых процессов в криолитозоне на материалах космической съемки.

вита эрозия. Типичный вид участка абразионного берега представлен на рис. 1.

Исследование было сосредоточено на морфологических особенностях верхней части оползней на границе с прилегающей водораздельной поверхностью. Характерной особенностью этой части оползневых тел являются дуги, ограничивающие оползневое тело и являющиеся одновременно его границей с водораздельной поверхностью. Несколько схематизируя, главнейшие морфологические особенности оползневого тела в рассматриваемой области описываются, прежде всего, длиной хорды, которая соединяет концы дуги и длиной дуги, которая в значительной мере коррелирует с длиной хорды.

При развитии оползания на склоне происходят следующие основные процессы:

- формирование нового оползневого тела и соответствующих дуг и хорд,
- стирание части старых (уже существующих) оползневых тел с коррекцией соответствующих дуг и хорд,
- исчезновение оползневого тела и, соответственно, его дуги и хорды в случае полного стирания существующего оползня новым оползневым телом.

На основании изложенного можно конкретизировать задачи работы.

Из проведенного анализа следует, что вероятностное распределение длин хорд, наблюдаемых в каждый момент совокупности оползней, отличается от распределения размеров хорд образующих молодых оползней за счет стирания части оползневых тел и даже полного стирания оползней. Представляет интерес выявление взаимосвязи размеров хорд наблюдаемого ансамбля оползней и образующихся молодых оползней, а также

получение информации о наблюдаемом вероятностном распределении длин хорд.

Другой существенный вопрос – изменение средней плотности расположения оползней вдоль бровки склона с течением времени. Представляется очевидным, что на любом участке склона будет формироваться бесконечно большое число оползней при достаточно длительном времени их развития. Но при этом, учитывая стирание уже существующих оползней, остается неясным, какой будет наблюдаемая плотность расположения оползней, и от каких факторов она будет зависеть.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Методика исследования включала:

- формирование математической модели развития морфологических особенностей (длин хорд оползней) абразионных берегов с развитием оползневых процессов;
- математический анализ модели развития морфологических особенностей абразионных берегов с развитием оползневых процессов;
- эмпирическое изучение распределения длин хорд оползней, включающее:
  - выбор ключевых участков,
  - измерение необходимых параметров по материалам космической съемки,
  - статистическую обработку полученных характеристик морфологического строения оползней и анализ полученных результатов.

Выбор ключевых участков выполнен на основе требований относительной морфологической однородности участка и однородности физико-географических 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 с использованием космических снимков. В итоге было выбрано пять участков протяженностью 2.5–10.1 км, имеющих в целом прямолинейное простираение (рис. 2) и расположенных в пределах береговой линии полуостровов Канин нос и Ямал.

Для анализа морфологических особенностей были использованы космические снимки высокого разрешения. На них были отдешифрированы бровки склонов и выделены оползневые дуги, а также проведены хорды. Измерение хорд выполнялось с помощью средств геоинформацион-

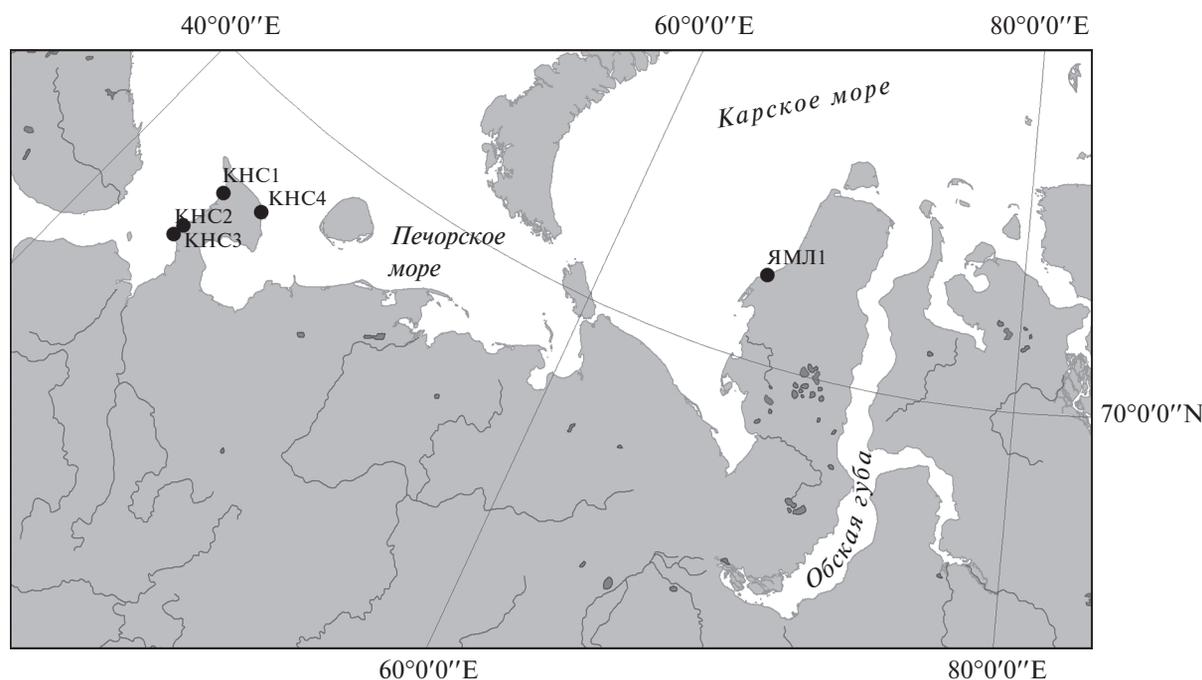


Рис. 2. Схема расположения ключевых участков.

ной системы ArcGIS. Полученные выборки сопоставлялись с различными теоретическими распределениями; сопоставление выполнялось с использованием критерия согласия хи-квадрат (критерия Пирсона) в программе Statistica.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Первым этапом решения поставленных задач стали формирование модели развития длин хорд в ходе оползневой процесса и получение результатов ее анализа.

Рассмотрим бесконечный прямолинейный склон длины  $L$  с постоянными однородными физико-географическими, геолого-геоморфологическими и геокриологическими условиями, развивающийся за счет рассматриваемых процессов. В качестве основного элемента границы рассматриваем дугу и соответствующую ей хорду.

Примем в качестве основания модели следующие допущения:

а) вероятность появления новых дуг (в количестве  $k = 1, 2, \dots$ ) за время  $\Delta t$  с центральной точкой на отрезке береговой линии  $\Delta l$  определяется только величинами временного интервала и отрезка<sup>1</sup>

$$p_1(\Delta l, \Delta t) = \lambda \Delta l \Delta t + o(\Delta l \Delta t) \text{ при } k = 1,$$

$$p_k(\Delta l, \Delta t) = o(\Delta l \Delta t), \quad k > 1;$$

<sup>1</sup> При этом вероятность появления более одного оползня (дуги) с центральной точкой на этом отрезке за этот же временной интервал много меньше, чем вероятность появления одного.

б) хорды дуг возникающих оползней имеют постоянное распределение  $F_0(x)$ .

Рассмотрим существующий оползень (1) с соответствующей дугой и хордой АВ. Оценим вероятность того, что за данный интервал  $\Delta t$  оползень не будет задет возникшим новым оползнем (2) с хордой CD с центральной точкой  $O_2$  (рис. 3).

Данная вероятность определяется вероятностью того, что расстояние  $O_2C$  от центральной точки до границы нового оползня (2) (обозначим его величину  $\xi_1$ ) будет меньше, чем расстояние  $O_2B$  до границы рассматриваемого существующего оползня (1). С учетом равновероятности положения центральной точки нового оползня на любом участке  $\Delta x$  береговой линии длины  $L$  (допущение модели "а") искомую вероятность получаем, перебирая все возможные положения центральной точки, интегрированием

$$\alpha = \int_0^L F_1(x) \frac{dx}{L},$$

где  $F_1(x)$  – распределение  $\xi_1$ ; оно очевидным образом связано с распределением длины хорды оползня (представляя собой ее половину).

Соответственно, вероятность того, что существующий оползень не будет задет новым оползнем равна

$$1 - \alpha = \frac{1}{L} \int_0^L (1 - F_1(x)) dx. \quad (1)$$

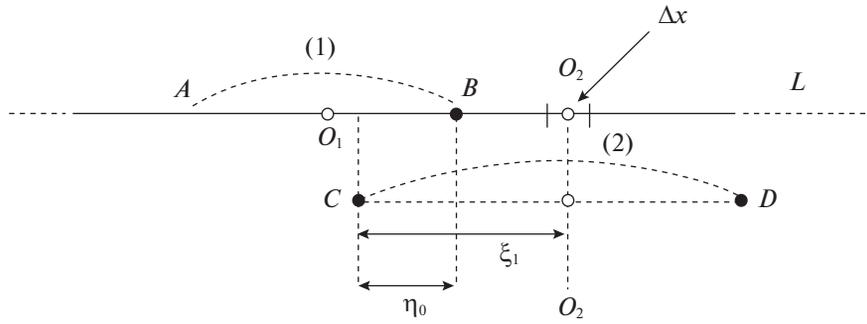


Рис. 3. Схема, поясняющая формирование морфологических особенностей оползневого склона (объяснения в тексте).

Оценим вероятность того, что рассматриваемый оползень не будет задет  $m$  новыми оползнями, возникшими за время  $u$ .

Из предположения модели (а) однозначно следует (см., например [2, 3]), что число  $\nu$  возникших новых оползней за время  $u$  на длине  $L$  отвечает распределению Пуассона

$$P_\nu(k) = \frac{(\lambda u L)^k}{k!} e^{-\lambda u L},$$

где  $\lambda$  – средняя плотность генерации оползней.

С учетом независимости событий, вероятность, что  $m$  из  $k$  оползней затронут рассматриваемый оползень (1), получаем с помощью числа сочетаний из  $k$  по  $m$

$$P_\mu^0(m|k) = \frac{k!}{m!(k-m)!} (1-\alpha)^m \alpha^{k-m} \frac{(\lambda u L)^k}{k!} e^{-\lambda u L},$$

и перебирая все возможные значения  $k$  ( $k \geq m$ ), получаем распределение числа задевших оползней  $\mu$ . После упрощения получаем

$$P_\mu^0(m) = \frac{[\lambda u(1-\alpha)L]^m}{m!} e^{-\lambda u(1-\alpha)L}.$$

Отказавшись от ограничения длины береговой линии, переходя к пределу  $L \rightarrow +\infty$ , с учетом (1) получаем

$$P_\mu(m) = \frac{(\lambda u M \xi_1)^m}{m!} e^{-\lambda u M \xi_1}, \quad (2)$$

где  $M \xi_1$  – половина средней длины хорды.

Отсюда, соответственно, вероятность того, что оползень за время  $u$  не будет задет другими более поздними оползнями, равна

$$P_\mu(0) = e^{-\lambda u M \xi_1}, \quad (3)$$

а вероятность того, что он будет задет (в том числе полностью стерт), составляет

$$1 - P_\mu(0) = 1 - e^{-\lambda u M \xi_1}. \quad (4)$$

Распределение величины стирания оползня ( $\eta$ ) за время  $u$ , т.е. распределение величины сокращения

хорды оползня за счет стирания более молодыми, возникшими позднее оползнями. Сначала оценим распределение величины стирания  $\eta_0$  рассматриваемого оползня (1) одним более молодым оползнем (2) при условии, что оползень (1) затронут стиранием, т.е.  $\eta_0 > 0$ . При этом величина стирания понимается как величина “захождения” границы С оползня (2) за границу В оползня (1), и не исключается его полное стирание (1) (см. рис. 3).

Исходя из допущения модели (а) и учитывая, что центральная точка оползня (2) с равной вероятностью может оказаться на любом отрезке одинаковой длины  $\Delta x$  на береговой линии  $L$ , после упрощения путем интегрирования можно определить распределение величины стирания  $F_{\eta_0}(y)$  при условии  $\eta_0 > 0$  как вероятность того, что половина длины хорды оползня (2) будет больше расстояния  $x$  от центральной точки  $O_2$  оползня (2) до границы оползня (1) точки В, но при этом меньше  $y$ :

$$F_{\eta_0}(y) = \frac{\int_0^L [F_1(y+x) - F_1(x)] \frac{dx}{L}}{\int_0^L [1 - F_1(x)] \frac{dx}{L}}.$$

Переходя к пределу при  $L \rightarrow \infty$  (т.е. при большой длине береговой линии), после упрощения получаем

$$F_{\eta_0}(y) = \frac{1}{M \xi_1} \int_0^y [1 - F_1(x)] dx. \quad (5)$$

Отсюда нетрудно получить соотношение для среднего значения величины стирания

$$M \eta_0 = \frac{1}{4} \frac{M^2 \xi_0}{M \xi_0},$$

где  $M \xi_0, M^2 \xi_0$  – математическое ожидание и момент второго порядка размеров хорды образовавшегося молодого оползня соответственно.

Получим распределение суммарной величины стирания  $\eta$  рассматриваемого оползня (1) возраста  $u$  до настоящего момента всеми задевшими его более молодыми, пока не принимая в расчет, был ли полностью стерт оползень (1) в какой-либо момент времени. В этом случае общее стирание отвечает сумме случайного числа стираний, независимых по допущениям модели, каждое из которых имеет распределение, отвечающее выражению (5). Учитывая, что число задевших оползней подчиняется распределению Пуассона (см. (2)), и вероятность того, что оползень за время  $u$  будет задет другими более поздними оползнями, получаем распределение суммарной величины стирания:

$$F_{\eta}(x, u) = \frac{e^{-\lambda u M \xi_1}}{1 - e^{-\lambda u M \xi_1}} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(\lambda u M \xi_1)^k}{k!} \prod_{\otimes}^m F_{\eta_0}(x),$$

где  $\prod_{\otimes}^m F_{\eta_0}(x)$  – свертка  $k$  одинаковых распределений  $F_{\eta_0}(x)$ .

*Распределение размера  $\tau$  хорды оползней, появившихся в интервале времени  $[0, T]$ , при условии, что оползень не стерт целиком.* Вероятность того, что оползень возраста  $u$  будет иметь размер хорды не больше заданного  $y$ , определяется, если:

- стирания не было, величиной  $F_0(y)$ ,
- стирание было, величиной

$$\int_0^{\infty} [F_0(y+x) - F_0(x)] f_{\eta}(x, t) dx,$$

где  $f_{\eta}(x, t)$  – плотность распределения суммарного стирания через время  $t$  после начала процесса.

Соответственно, учитывая:

- вероятность того, что оползень будет задет или не будет задет (см. (3) и (4)),
- одинаковую вероятность формирования оползня на каждом равном временном отрезке,
- условие, что оползень должен не быть стерт полностью,

после упрощения, интегрируя по времени, можно оценить искомое распределение размера  $\tau$  хорды оползня (безотносительно его возраста)

$$F_{\tau}(y) = \frac{F_0(y) + \int_0^{+\infty} [F_0(y+x) - F_0(x)] \left[ \sum_{k=1}^{+\infty} \prod_{\otimes}^k F_{\eta_0}(x) \right] dx}{1 + \int_0^{+\infty} [1 - F_0(x)] \left[ \sum_{k=1}^{+\infty} \prod_{\otimes}^k F_{\eta_0}(x) \right] dx}.$$

Используя аппарат характеристических функций, удалось показать, что распределение

$$F(x) = \frac{1}{k} \sum_{m=1}^k \prod_{\otimes}^m F_{\eta_0}(x) \quad \text{при } k \rightarrow +\infty$$

сходится к равномерному распределению.

Исходя из этого, после упрощения получаем следующее выражение, описывающее *взаимосвязь плотности распределения наблюдаемых размеров хорд и распределения размеров хорд вновь образующихся молодых оползней* при большом времени развития склона

$$f_{\tau}(y) = \frac{f_0(y) + \frac{4M\xi_0}{M^2\xi_0} [1 - F_0(y)]}{1 + \frac{4(M\xi_0)^2}{M^2\xi_0}}.$$

Следующим шагом явилась *оценка изменения средней плотности расположения оползней во времени.*

Оценим среднюю плотность расположения оползней в момент времени  $T$  после начала развития процесса на участке  $\gamma(T)$ . Ее величина определяется количеством появившихся оползней за время  $T$  и вероятностью каждого оползня не быть стертым к этому моменту. Учитывая равномерность (в среднем) генерации оползней во времени, после упрощения получаем

$$\gamma(T) = \int_0^T \left[ e^{-\lambda M \xi_1 t} + (1 - e^{-\lambda M \xi_1 t}) \int_0^T [1 - F_0(x)] f_{\eta}(x, t) dx \right] \lambda dt.$$

Переходя к пределу при  $T \rightarrow +\infty$  и интегрируя, получаем

$$\gamma(\infty) = \frac{1}{M \xi_1} \left[ 1 + \int_0^{+\infty} [1 - F_0(x)] \left[ \sum_{k=1}^{+\infty} \prod_{\otimes}^k F_{\eta_0}(x) \right] dx \right].$$

Используя ход рассуждений, аналогичный приведенному выше, формируем выражение для плотности расположения оползней через значительное время развития

$$\gamma(\infty) = \frac{2}{M \xi_0} \left[ 1 + \frac{4(M \xi_0)^2}{M^2 \xi_0} \right].$$

Таким образом, получен вывод, что при значительном времени развития средняя плотность расположения оползней вдоль береговой линии стабилизируется около некоторой конечной величины. Также стабилизируется и распределение наблюдаемых размеров хорд оползней, и устанавливается некоторое не меняющееся во времени их распределение. При этом обе характеристики не зависят от интенсивности генерации новых оползней  $\lambda$ , а только от распределения размеров образующихся молодых оползней.

Таким образом, можно констатировать, что в ландшафте абразионных берегов с развитием оползневых процессов устанавливается состояние динамического равновесия морфологической структуры данного ландшафта, по крайней мере, в отношении средней плотности располо-

**Таблица 1.** Результаты статистической обработки данных по выборкам длин хорд оползней на ключевых участках

Участок	Объем выборки	Нормальное распределение			Логнормальное распределение			Гамма-распределение		
		среднее	стандарт	$p$	среднее логарифма	стандарт логарифма	$p$	$\lambda$	$\alpha$	$p$
КНС1	183	50.3	43.2	0.000	3.675	0.666	0.288	22.66	2.22	0.015
КНС2	181	59.6	43.0	0.000	3.881	0.639	0.241	23.18	2.57	0.010
КНС3	181	22.8	15.1	0.000	2.951	0.586	0.782	7.63	2.99	0.131
КНС4	159	45.6	27.1	0.000	3.678	0.529	0.339	12.40	3.68	0.153
ЯМЛ1	108	18.0	11.3	0.000	2.751	0.504	0.574	4.71	3.81	0.314

Примечание.  $\lambda$  – масштабный параметр,  $\alpha$  – параметр формы,  $p$  – параметр (разница эмпирического и теоретического распределений статистически значима на уровне 0.99 в случае  $p < 0.01$ ).

жения и протяженности оползней по простираю к береговой линии.

Вышеперечисленные результаты безусловно получены при определенных упрощающих предположениях о постоянстве климатических условий и однородности береговой линии в отношении развития оползневого процесса. Однако и в этом случае, с нашей точки зрения, они представляют определенный интерес как некоторый репер, по отношению к которому можно рассматривать различные осложнения условий.

На следующем этапе был проведен комплекс исследований по эмпирическому изучению распределения длин хорд оползней на конкретных участках, включающий получение выборок длин хорд для оползней каждого участка и их сопоставление с теоретическими распределениями для выявления характерных особенностей распределений<sup>2</sup>. Результаты статистической обработки по всем участкам приведены в табл. 1.

На различных ключевых участках средние размеры хорд оползневых дуг заметно отличаются (от 18 до 60 м), при этом наименьшие значения приходятся на Ямальский участок. На всех участках наблюдается значительный разброс значений, и среднее квадратическое отклонение составляет от 60 до 86% от среднего.

Анализ сходства эмпирических распределений длин хорд, стрелок, радиусов кривизны с различными видами теоретических распределений (нормальное, логнормальное, гамма-распределение и экспоненциальное) дает интересные результаты. На всех участках на уровне значимости 0.99 наблюдается один и тот же тип распределения – логнормальное. Это выполняется при зна-

чительной разнице значений параметров распределения. Гамма распределение также соответствует эмпирическим данным, но несколько хуже. Нормальное распределение не согласуется с эмпирическими данными ни на одном участке.

На рис. 4 показаны примеры соответствия эмпирических распределений и теоретических логнормальных распределений.

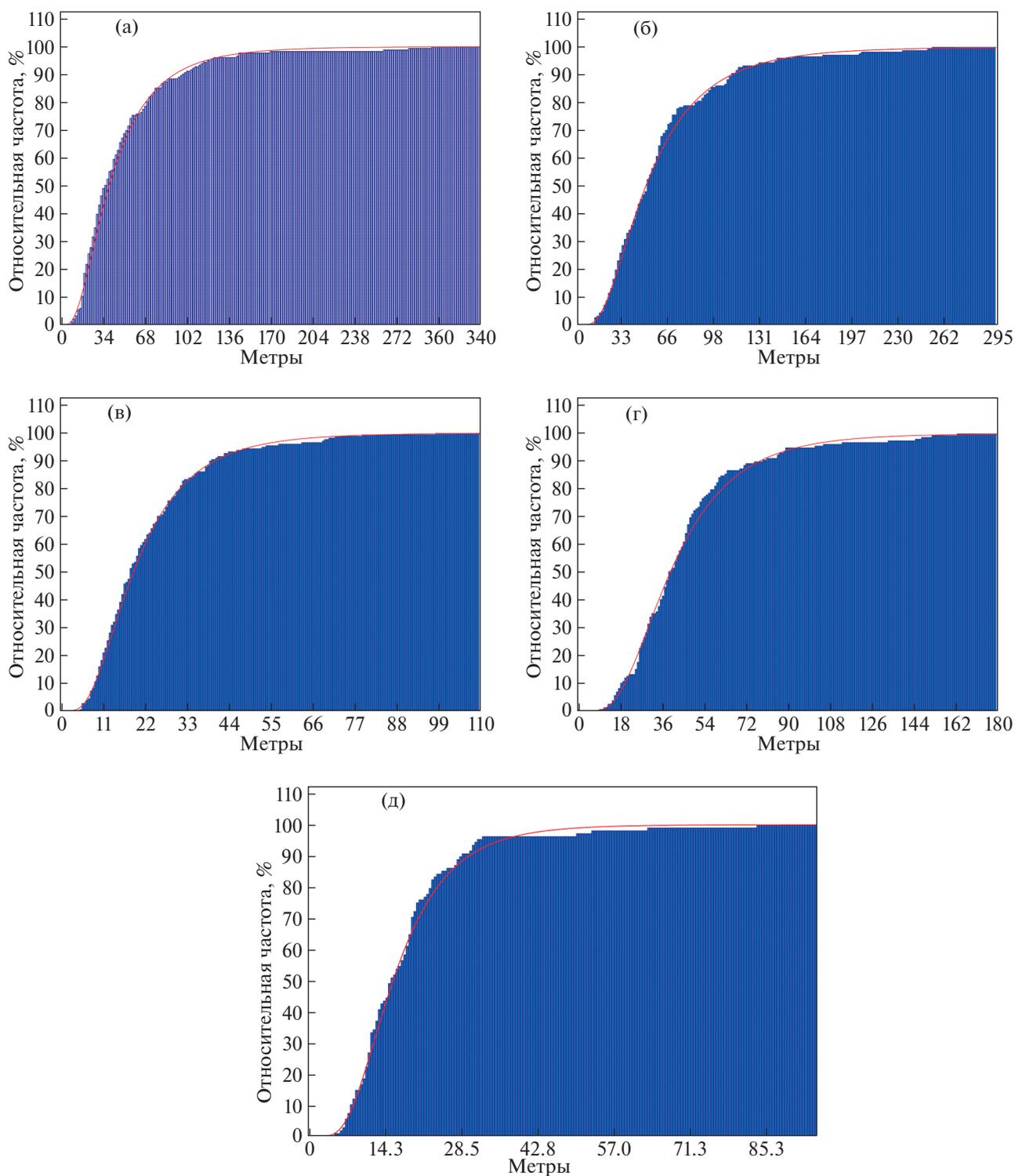
Таким образом, исследования реальных распределений длин хорд показывают их соответствие одному и тому же виду вероятностных распределений на всех участках, т.е. между морфологическими особенностями различных участков абразионных берегов с развитием оползневых процессов существует определенная общность, подтверждающаяся данными по 5 участкам полуостровов Канин нос и Ямал. На всех участках, находящихся в различных физико-географических и инженерно-геокриологических условиях, распределение размеров хорд отвечает логнормальному распределению. В то же время по значениям средних длин хорд Ямальский участок отличается от участков Канина носа. Это говорит о том, что физико-географические и инженерно-геокриологические условия, не оказывая сильного влияния на вид распределений, тем не менее, значительно влияют на значения параметров – средние длины хорд, разброс длин.

Близость к гамма-распределению возможно объясняется близостью самих распределений в определенном интервале значений параметров, это отмечалось в ряде работ [5].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование позволяет получить следующие выводы.

<sup>2</sup> Выполнено совместно с Т.В. Орловым, М.В. Архиповой, В.В. Бондарь.



**Рис. 4.** Соответствие эмпирических распределений (синий контур) и теоретических (красная линия) логнормальных распределений по ключевым участкам: а – КНС1, б – КНС2, в – КНС3, г – КНС4, д – ЯМЛ1.

Как показывает моделирование в условиях относительного однородного по геологическим и геокриологическим условиям абразивного склона, устанавливается динамическое равновесие,

которое проявляется в стабилизации средней плотности расположения оползней и стабилизации вероятностного распределения их размеров по простиранию склона.

Обоснована аналитическая зависимость между вероятностным распределением размеров хорд образующихся молодых оползней и вероятностным распределением хорд всех представленных оползней, в том числе частично стертых более поздними оползнями, а также между средней плотностью расположения оползней вдоль береговой линии и параметрами распределения размеров хорд образующихся молодых оползней.

Анализ эмпирических данных по полуостровам Канин нос и Ямал показал соответствие распределений наблюдаемых длин хорд оползней абразионных склонов логнормальному распределению.

Полученные результаты могут быть использованы в различных аспектах. Так, одним из направлений использования могут быть оценка и моделирование процесса отступления берегов. Отступление бровки склона во многом определяется величиной стрелки дуги образующегося оползневого тела, а длина последней коррелирует, как показали исследования, с размерами хорды. Таким образом, модель, характеризующая формирование последовательности хорд, в значительной мере связана с моделированием отступления бровки.

Другое направление связано с исследованием размеров формирующихся оползней. Результаты настоящей работы позволяют по наблюдаемому распределению размеров хорд оценить размеры хорд формирующихся молодых оползней.

Безусловно, выполненная работа обладает рядом ограничений. Так, например, предполагается постоянство условий развития оползневых процессов, в частности климатических условий. Но

нам представляется, что, тем не менее, выполненное исследование является полезным шагом в изучении берегов с развитием оползневых процессов и может быть использовано при переходе к более сложным и совершенным моделям.

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

#### 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. Викторов А.С. Математическая морфология ландшафта. М.: Тратек, 1998. 220 с.
3. Карлин С. Основы теории случайных процессов. М.: Мир, 1971. 536 с.
4. 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.
5. Пузаченко Ю.Г. Математические методы в экологических и географических исследованиях. М.: Издательский центр "Академия", 2004. 416 с.
6. Aleksyutina D.M., Shabanova N.N., Kokin O.V., Vergun A.P. et al. Monitoring and modelling issues of the thermoabrasive coastal dynamics // In IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 2018. № 193. № 012003.
7. 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.

## MODELING MORPHOLOGICAL FEATURES OF ABRASION LANDSLIDE COASTS IN CRYOLITHOZONE

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

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

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

This research is aimed at the behavior analysis of quantitative morphological features at abrasion landslide coasts in cryolithozone and their empirical investigation. The research deals with the morphological pattern of the upper landslide segment. The arcs limiting the landslide body and their chords are the characteristic features of this part of landslide bodies at the border with the watershed. Five key sites at the Kanin Nos and Yamal peninsulas were studied. The analysis performed proved that the probabilistic distribution of chord lengths observed at each moment of time for the entire set of landslides differs from that of chord lengths for young landslides formed due to partial and complete erasure of landslide bodies. The results of mathematical modeling in relatively uniform abrasion slope in regards to their geology and permafrost reveal the state of dynamic balance, which is manifested in the stabilization of landslide average density and landslide size probabilistic distribution along the slope strike. The analytical relationship is obtained between the probability distribution of chord lengths for emerging young landslides and the probability distribution of chord lengths for all presented landslides, including those partially erased by later landslides, as well as between the landslide average density along the coastline and the chord length distribution parameters for the young landslides.

Empirical data analysis for the key sites demonstrates a lognormal distribution for all the measured chord lengths.

**Keywords:** *mathematical modeling of landslide morphological features, abrasion coasts, mathematical morphology of landscape, dynamic equilibrium of coasts*

#### REFERENCES

1. Belova, N.G., Shabanova, N.N., Ogorodov, S.A., Kamalov, A.M. et. al. *Dinamika termoabrazionnykh beregov Karskogo morya v raione mysy Kharasavey (Zapadnyi Yamal)* [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. Viktorov, A.S. *Matematicheskaya morfologiya landshafta* [Mathematical morphology of the landscapes]. Moscow, Tratek Publ., 1998, 220 p. (in Russian)
3. Karlin, S. *Osnovy teorii sluchainykh protsessov* [Fundamentals of the theory of random processes]. Moscow, Mir Publ., 1971, 536 p. (in Russian)
4. Novikov, V.N., Fedorova, Ye.V. *Razrushenie beregov v yugo-vostochnoi chasti Barentseva morya* [Coastal destruction in the southeastern part of the Barents Sea]. *Vestnik Moskovskogo universiteta, Seriya 5: geografiya*, 1989, no. 1, pp. 64–68. (in Russian)
5. Puzachenko, Yu.G. *Matematicheskie metody v ekologicheskikh i geograficheskikh issledovaniyakh* [Mathematical methods in ecological and geographical research]. Moscow, Akademiya Publ., 2004, 416 p. (in Russian)
6. Aleksyutina, D.M., Shabanova, N.N., Kokin, O.V., Vergun, A.P. et al. Monitoring and modelling issues of the thermoabrasive coastal dynamics. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2018, no. 193, no. 012003.
7. 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.