

МОРФОМЕТРИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ АБРАЗИОННО-ТЕРМОДЕНУДАЦИОННЫХ БЕРЕГОВ ПО ДАННЫМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И КОСМИЧЕСКИХ СЪЕМОК[#]

© 2025 г. А. С. Викторов

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

E-mail: vic_as@mail.ru

Поступила в редакцию 22.05.2024 г.

После доработки 17.10.2024 г.

Принята к публикации 10.01.2025 г.

Цель работы — изучить закономерности изменения во времени количественных параметров циркуобразных форм абразионных берегов в криолитозоне. Анализ процессов изменения плотности их расположения показал, что в этом изменении сочетаются противоположные тенденции, с одной стороны, уменьшения числа форм за счет стирания более старых циркуобразных форм более поздними, с другой — роста их количества из-за возникновения новых циркуобразных форм внутри контуров существующих, с увеличением их числа за счет деления и за счет появления новых циркуобразных форм. На основе разработанной математической модели морфологической структуры абразионных морских берегов в криолитозоне был выполнен анализ изменения средней плотности расположения и средних размеров циркуобразных форм, он позволил получить выражение, описывающее изменение этих параметров во времени, и показал, что в однородных физико-географических условиях должно происходить монотонное увеличение плотности расположения циркуобразных форм и уменьшение их средних размеров. Локальные физико-географические, в том числе геокриологические условия, влияют на значение параметров, входящих в зависимость, вид зависимости при этом сохраняется. При значительном времени развития, как показывает рассмотрение полученной зависимости, средняя линейная плотность расположения и средний размер циркуобразных форм стремятся к некоторым предельным значениям, хотя при этом сам береговой склон, отступая, все время изменяется, происходит появление новых циркуобразных форм, частичное или полное стирание уже существующих. Таким образом, по прошествии значительного времени развития, отмечаются признаки того, что морфологическая структура абразионного берега оказывается в состоянии динамического равновесия. Анализ материалов повторных космических съемок на шести участках абразионных берегов показал, что на трех наблюдаются рост плотности расположения циркуобразных форм и уменьшение средних размеров, а на трех — практические постоянство значений параметров, и это находится в согласии с полученными результатами моделирования. Полученные закономерности должны учитываться при прогнозе динамики арктических берегов на основе использования материалов космических съемок.

Ключевые слова: математическая морфология ландшафта, абразионные берега, циркуобразные формы, математические модели морфологических структур, данные дистанционного зондирования

DOI: 10.31857/S2949178925020054; **EDN:** GPVOCR

ВВЕДЕНИЕ

Многие исследования посвящены морфологическим особенностям и динамике берегов в криолитозоне. Так, А. В. Новиковой (2022) были определены максимальные среднесуточные скорости отступления берегов на о-ве Белом и берегов

Байдарацкой губы, и в работе выявлена тенденция к усилению термоабразионных процессов с начала века. Максимальные скорости отступления берега наблюдались на участках, сложенных высокольдистыми суглинистыми отложениями с выходами подземных льдов и находящихся под интенсивным воздействием термоабразии (Белова и др., 2017). Исследованы ландшафтные факторы, влияющие на термоденудацию (Совершаев, 1998; Васильев и др., 2001; Кизяков, 2005; Хомутов, Лейбман, 2008). Ряд исследователей изучал статистические параметры термоцирков, не связанных с морскими берегами (Нестерова и др.,

[#] Ссылка для цитирования: Викторов А. С. (2025) Морфометрические особенности развития абразионно-термоденудационных берегов по данным математического моделирования и космических съемок. *Геоморфология и палеогеография*. Т. 56. № 2. С. 251–261. <https://doi.org/10.31857/S2949178925020054>; <https://elibrary.ru/GPVOCR>

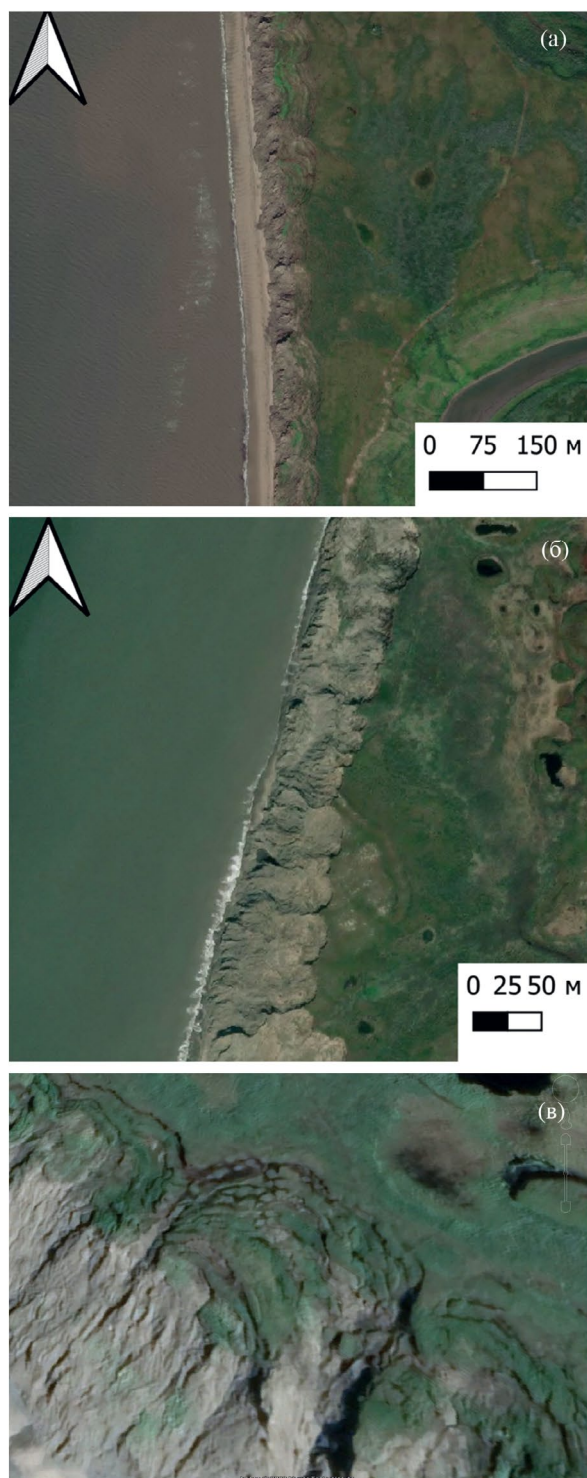


Рис. 1. Типичное изображение абразионных берегов с развитием циркообразных форм в криолитозоне на материалах космической съемки (Викторов и др., 2023).

(а, б) — общий вид, (в) — один из вариантов ЦФ.

Fig. 1. Typical image of abrasion shores under thermal cirques developing within the cryolithozone on space imagery (Victorov et al., 2023).

(a, б) — general view, (в) — thermal cirques.

2021). Проводились исследования параметров отступления берегов в разных районах. Так были установлены значения количественных параметров отступления берегов Ляховских островов за 50 лет, проведена типизация разрушений берегов (Пижанкова, Добрынина 2010; Пижанкова 2011). При этом определено, что скорости отступления могут достигать 2.5 м/год. Получена информация о скорости отступления термоцирков Югорского полуострова (Лейбман и др., 2021), и оценена связь рассматриваемого процесса с климатическими характеристиками (Leibman et al., 2021). На примере Печорского и Карского морей были выявлены негативные последствия техногенного влияния на абразию берегов, скорость отступления берегов при этом может увеличиваться в 2–3 раза (Огородов и др., 2014).

Однако большинство исследований посвящено отступанию берегов и, соответственно, изучению протяженности оползней и термоцирков и ее изменения в направлении, перпендикулярном береговой линии. При этом сравнительно малое внимание уделялось другим особенностям морфологического строения берегов.

Цель работы — изучить закономерности изменения во времени количественных параметров циркообразных форм (ЦФ) абразионных берегов в криолитозоне, а именно плотности расположения циркообразных форм и их средних размеров.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследования стали абразионные берега с развитием ЦФ, которые, как показывает анализ материалов космической съемки, весьма часто характерны для данного вида берегов как термоабразионных, так и абразионно-термоденудационных. Рельеф берегов здесь представляет собой сочетание ЦФ, включающих фрагменты оползневых тел разного возраста с развитием интенсивных термоабразионных и термоденудационных (термоэрозия, термокарст и др.) процессов, а также с наличием обрывистого участка. Местами на склоне наблюдаются дугообразные остаточные участки водораздельной поверхности, отвечающие различным стадиям оползания (фрагменты равнинной поверхности, сохранившиеся на оползневых телах). Характерной особенностью ЦФ является четкая дугообразная граница с прилегающей водораздельной поверхностью, хорошо дешифрируемая на материалах дистанционных съемок. Типичный вид представлен на рис. 1.

Изучение охватывало два основных параметра:

- среднюю линейную плотность расположения ЦФ, т.е. среднее число ЦФ на единицу длины береговой линии;

- средний размер ЦФ, за который принималась средняя длина хорды дуги, являющейся границей ЦФ с прилегающей водораздельной поверхностью.

Методика включала следующие этапы:

- создание и анализ математической модели изменения морфологического строения абразионных берегов криолитозоны;
- эмпирические исследования с проверкой полученных выводов.

Развитие берегов происходит под действием следующего комплекса процессов, влияющих на формирование значений среднего размера ЦФ и средней плотности их расположения (рис. 2):

- увеличение числа ЦФ за счет формирования новой ЦФ внутри границ существующей (“внутреннее стирание”); при этом происходит разбиение более старой ЦФ на две части с увеличением общего числа ЦФ;
- уменьшение числа существующих к рассматриваемому моменту ЦФ за счет полного стирания одной или нескольких (и, соответственно, их хорд) при наложении сформировавшейся новой ЦФ;
- частичное стирание существующих ЦФ (и соответственно их хорд) за счет наложения более молодых (“боковое стирание”).

Все три случая сопровождают появление на том или ином участке новой сформировавшейся ЦФ.

В целом процесс носит сложный стохастический характер, и в нем сочетаются противоположные тенденции: с одной стороны, уменьшения числа ЦФ, с другой – роста их числа. Естественно, на развитие процесса оказывают влияние случайные вариации размеров формирующихся молодых ЦФ.

Данное рассмотрение является более точным, чем предпринятое нами ранее (Викторов, 2022). В отличие от предыдущего учитывается возможность увеличения числа ЦФ за счет формирования новой ЦФ внутри границ существующей с разбиением последней на две части. Этот фактор очень усложняет анализ, но его учет делает модель более совершенной.

Для решения поставленной задачи сформируем выражение, описывающее динамику изменения числа ЦФ. Для этого используем модель формирования морфологической структуры прямолинейного длинного берега (L) с однородными геокриологическими и физико-географическими условиями. Предполагается также относительное постоянство во времени климатических условий. Модель базируется на следующих допущениях (Викторов, 2022):

- вероятность появления новых ЦФ (в количестве $k = 1, 2, \dots$) за время Δu на отрезке береговой

линии¹ Δl определяется только величинами временного интервала и отрезка:

$$p_1(\Delta l, \Delta u) = \lambda \Delta l \Delta u + o(\Delta l \Delta u), \quad (1)$$

$$p_k(\Delta l, \Delta u) = o(\Delta l \Delta u), \quad k > 1, \quad (2)$$

где λ – параметр, отвечающий среднему числу ЦФ, появляющихся за единицу времени на единице длины берега;

- размеры (длина хорды дуги) возникающих ЦФ не зависят от места их формирования и имеют постоянное распределение $F_0(x)$, не зависящее от времени².

Анализ позволил показать (Викторов, 2022), что в этом случае появление новых ЦФ отвечает пуассоновскому случайному процессу, т.е. вероятность появления k контуров на длине l за время u дается выражением:

$$P_\mu(k) = \frac{(\lambda ul)^k}{k!} e^{-\lambda ul}. \quad (3)$$

Отсюда также следует, что если интересующий отрезок берега имеет размер Δv , то вероятность однократного попадания правой границы формирующейся ЦФ внутрь этого отрезка за малый интервал времени Δu , исходя из предположения модели и пуассоновского характера процесса появления новых ЦФ, составляет:

$$q = \lambda \Delta v \Delta u + o(\Delta u), \quad (4)$$

а вероятность непопадания:

$$p_0^1 = e^{-\lambda \Delta v \Delta u}. \quad (5)$$

Кроме того, показана вероятность, что рассматриваемая существующая ЦФ не будет ни задета, ни стерта за время u формирующейся ЦФ с начальной точкой вне рассматриваемой существующей ЦФ:

$$p_0^2 = e^{-\lambda au}, \quad (6)$$

где a – математическое ожидание (средний размер) формирующихся (новых) ЦФ.

Определим вероятность того или иного взаимодействия существующей и возникающей ЦФ (рис. 2). Пусть существующая ЦФ имеет размер u (длина хорды). То, что ЦФ размером u не будет ни стерта, ни задета за интервал времени Δu , отвечает одновременному выполнению двух условий:

- начальная точка формирующейся ЦФ находится вне существующей ЦФ [выражение (5)];
- ЦФ при этом не задета [выражение (6)].

¹ За положение ЦФ условно принято положение точки правой границы ее хорды (начальная точка).

² Предполагаем, что распределение $F_0(x)$ имеет конечное среднее и дисперсию.

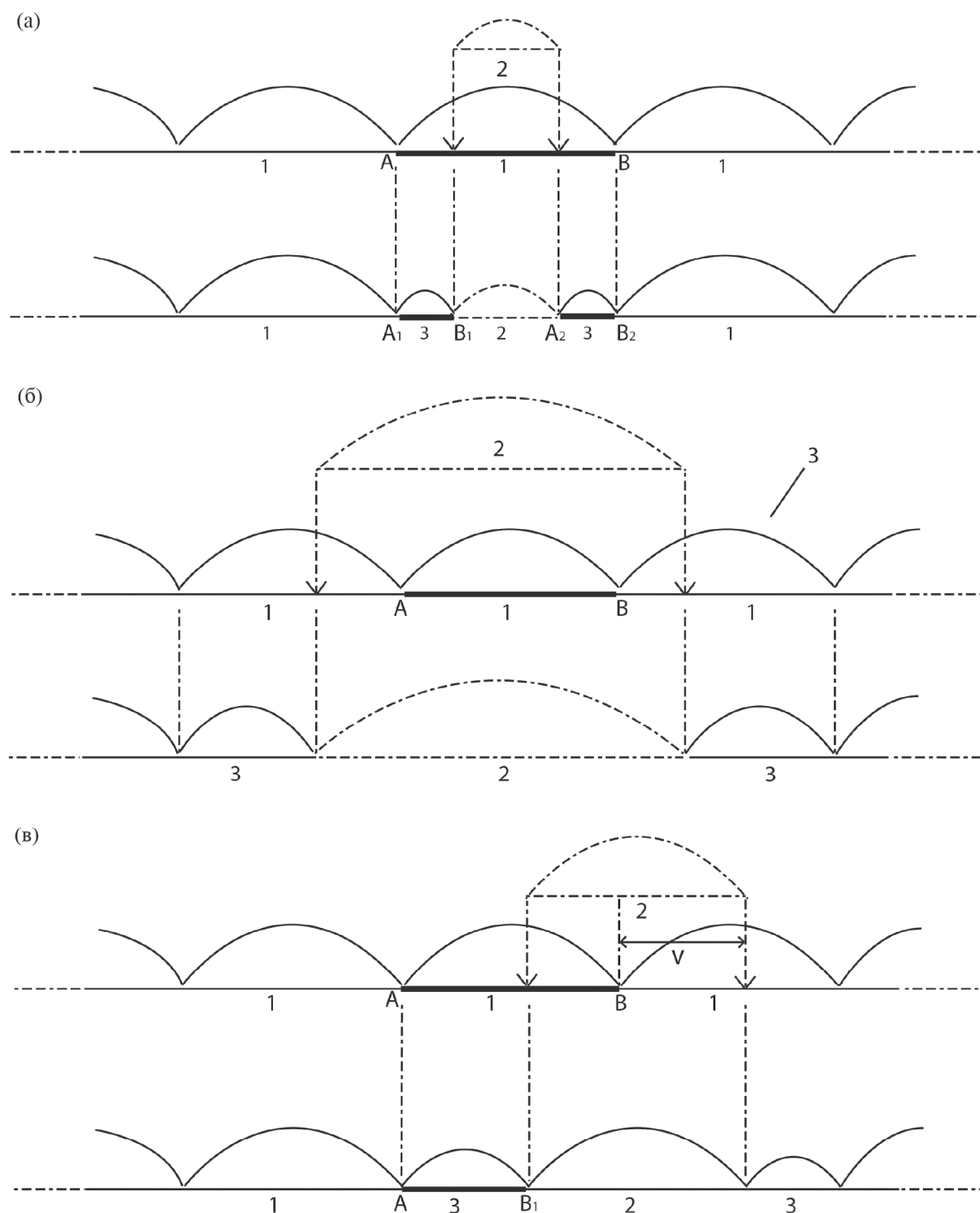


Рис. 2. Схема взаимодействия существующих и формирующихся молодых циркообразных форм.

(а) – “внутреннее стирание”; (б) – полное стирание; (в) – “боковое стирание”; *хорды*: АВ – рассматриваемой ЦФ, A_1B_1 , A_2B_2 , AB_1 – частей рассматриваемой ЦФ (пояснение в тексте), 1 – существующей ЦФ (граница ЦФ и прилегающей водораздельной поверхности), 2 – формирующейся ЦФ, 3 – остаточной ЦФ (после стирания); 4 – дуги ЦФ.

Fig. 2. Scheme of interaction among existing and emerging young thermal cirques.

(a) – “internal erasure”; (b) – complete erasure; (v) – external erasure; *chords*: АВ – chord of the considered thermal cirque, A_1B_1 , A_2B_2 , AB_1 – chords of parts of the thermal cirque (explanation in the text), 1 – chord of the existing thermal cirque (the border of the thermal cirque and the adjacent watershed surface), 2 – chord of the emerging thermal cirque, 3 – chord of the residual thermal cirque (after erasing); 4 – arcs of the thermal cirque.

Тогда с учетом пуассоновского характера процесса и независимости рассматриваемых событий искомая вероятность дается выражением:

$$p_0 = e^{-\lambda(a+y)\Delta u} = 1 - \lambda(a+y)\Delta u + o(\Delta u). \quad (7)$$

Вероятность внутреннего стирания (см. рис. 2а) ЦФ размером y определяется тем, что как одна, так и вторая концевые точки новой ЦФ находятся внутри существующей. С учетом равновероятности расположения начальной точки в любом месте хорды (допущение 3) с вероятностью, данной в выражении (4), интегрированием получаем вероятность внутреннего стирания за интервал времени Δu :

$$p_1 = \lambda \Delta u \int_0^y F_0(y-v)dv = \lambda \Delta u \int_0^y F_0(v)dv. \quad (8)$$

Вероятность частичного бокового стирания (рис. 2в) для существующей ЦФ размером y при начальной точке возникающей ЦФ справа от существующей получаем, учитывая, что размер формирующейся ЦФ должен быть больше расстояния от точки возникновения нового ЦФ до существующей (v), но не превосходить его размер, т.е. сумму этого расстояния и размера существующей ЦФ (y). Учитывая равновероятность расположения начальной точки формирующейся ЦФ на любом расстоянии от существующей и равенство:

$$\int_0^{+\infty} [1 - F_0(v)]dv = a, \quad (9)$$

а также возможность бокового частичного стирания не только справа, но и слева (т.е., удваивая вероятность), получаем:

$$\begin{aligned} p_2 &= 2\lambda \Delta u \int_0^{+\infty} [F_0(y+v) - F_0(v)]dv = \\ &= 2\lambda \Delta u \int_0^y [1 - F_0(v)]dv. \end{aligned} \quad (10)$$

Пусть в момент u число ЦФ составляет n_0 , рассмотрим момент времени $u + \Delta u$. Среднее изменение числа контуров за интервал Δu определяется следующими величинами, которые получаются путем интегрирования полученных выше вероятностей для учета всех возможных размеров ЦФ:

- средним числом ЦФ, не затронутых изменениями:

$$\Delta N_0(\Delta u) = n_0 \int_0^{+\infty} f(y, u) [1 - \lambda(a+y)\Delta u] dy + (\Delta u), \quad (11)$$

где $f(x, u)$ — плотность распределения размеров (длин хорд) ЦФ в момент u ;

- средним числом ЦФ, появляющихся за счет формирования новой ЦФ внутри границ существующей, при этом существующая ЦФ делится на два:

$$\Delta N_1(\Delta u) = 2n_0 \lambda \Delta u \int_0^{+\infty} f(y, u) \int_0^y F_0(v) dv dy; \quad (12)$$

- средним числом ЦФ, появляющихся за счет частичного бокового стирания существующей ЦФ новой:

$$\Delta N_2(\Delta u) = 2n_0 \lambda \Delta u \int_0^{+\infty} f(y, u) \int_0^y [1 - F_0(v)] dv dy; \quad (13)$$

- средним числом ЦФ, появляющихся за счет появления новых ЦФ, которое с учетом пуассоновского процесса появления контуров на всей рассматриваемой береговой линии длиной L дается выражением:

$$\Delta N_3(\Delta u) = \lambda L \Delta u. \quad (14)$$

Вероятность других изменений числа ЦФ за время Δu без полного стирания (например, деления более чем на две части при внутреннем стирании и других вариантах) требует появления более чем одной формирующейся ЦФ за названный интервал Δu , и, соответственно, с учетом пуассоновского характера процесса вероятность событий представляет собой бесконечно малую более высокого порядка, чем Δu :

$$N_4(\Delta u) = o(\Delta u). \quad (15)$$

Все иные варианты ЦФ, затронутых изменениями, описывают полностью стертые циркуобразные формы и, соответственно, в суммарное число форм в рассматриваемый момент $u + \Delta u$ не входят.

Таким образом, суммируя всё, можно записать равенство для математического ожидания числа ЦФ $N^1(u + \Delta u | n_0)$ в момент $u + \Delta u$ при условии числа ЦФ n_0 в момент u :

$$\begin{aligned} N^1(u + \Delta u | n_0) &= n_0 \int_0^{+\infty} f(y, u) [1 - \lambda(a+y)\Delta u] dy + \\ &+ 2n_0 \lambda \Delta u \int_0^{+\infty} f(y, u) \int_0^y [F_0(v) + [1 - F_0(v)]] dv dy + \\ &+ \lambda L \Delta u + o(\Delta u), \end{aligned} \quad (16)$$

или, упрощая, получаем:

$$\begin{aligned} N^1(u + \Delta u | n_0) &= n_0 \left[1 - \lambda a \Delta u - \lambda \Delta u \int_0^{+\infty} y f(y, u) dy + \right. \\ &+ \left. 2\lambda \Delta u \int_0^{+\infty} y f(y, u) dy \right] + \lambda L \Delta u + o(\Delta u). \end{aligned} \quad (17)$$

Умножая на вероятность числа ЦФ n_0 в момент u , упрощая и суммируя по n_0 , получаем выражение для изменения среднего числа ЦФ (18):

$$\begin{aligned} N(u + \Delta u) = \\ = N(u) \left[1 - \lambda a \Delta u + \lambda \Delta u \int_0^{+\infty} y f(y, u) dy \right] + \\ + \lambda L \Delta u + o(\Delta u), \end{aligned} \quad (18)$$

где $N(u)$ — математическое ожидание (среднее число) ЦФ на участке в момент u .

Вычитая $N(u)$, деля на L и Δu , учитывая, что

$$\gamma(u) = \frac{N(u)}{L} = \frac{1}{\int_0^{+\infty} f(y, u) y dy}, \quad (19)$$

где $\gamma(u)$ — средняя линейная плотность расположения ЦФ вдоль береговой линии, преобразуя и далее переходя к пределу при $\Delta u \rightarrow 0$, получаем:

$$\frac{d\gamma(u)}{du} = 2\lambda - \lambda a \gamma(u). \quad (20)$$

Полученное дифференциальное уравнение может быть решено стандартными методами как уравнение с разделяющимися переменными. Начальные условия решения могут быть определены исходя из того, что в начальный момент еще не происходит перекрытия и, соответственно, стирания ЦФ, т.е. распределение размеров совпадает с распределением размеров формирующихся ЦФ $F_0(x)$, а средняя линейная плотность расположения, будучи взаимно обратной величиной со средним размером ЦФ, соответственно, дается выражением:

$$\gamma(0) = 1/a, \quad (21)$$

где a — математическое ожидание (средний размер) формирующихся новых ЦФ.

С этим начальным условием окончательно получаем:

$$\gamma(u) = \frac{2 - e^{-\lambda a u}}{a}, \quad (22)$$

соответственно, изменение среднего размера ЦФ (длины хорды дуги) дается выражением:

$$h(u) = \frac{a}{2 - e^{-\lambda a u}}, \quad h(0) = a. \quad (23)$$

В рамках исследований было выполнено изучение реального изменения количественных параметров ЦФ. Методика эмпирического изучения включала следующие основные элементы:

- выбор эталонных участков и получение материалов космической съемки этих участков за два срока;

- дешифрирование границы ЦФ с прилегающей водораздельной поверхностью по материалам космической съемки высокого разрешения и определение хорд;

- статистическая обработка количественных характеристик морфологического строения ЦФ;

- анализ полученных результатов.

Выбор эталонных участков произведен с выполнением требований относительной морфологической однородности участка и однородности физико-географических и геолого-геоморфологических условий. Морфологическая однородность анализировалась на основе материалов космической съемки высокого разрешения и определялась на основании однотипности сочетаний элементов изображения, отражающих соответственно однотипность морфологического строения участка. Однородность геолого-геоморфологических условий анализировалась на базе материалов государственной геологической съемки масштаба 1:200000 с использованием космических снимков. В итоге было выбрано пять участков (рис. 3).

Участки сложены с поверхности морскими, ледниковыми, озерно-ледниковыми, аллювиально-морскими и озерно-аллювиальными отложениями, представленными песками, алевритами, гравийно-галечными отложениями, супесями и суглинками с валунами и галькой, а также отложениями алевритово-мелко-тонкопесчаного состава; многолетнемерзлые породы имеют прерывистое, массивно-островное и массивное распространение. Более подробно характеристика участков приведена в работе (Викторов и др., 2023).

На участки были получены материалы космической съемки высокого разрешения за два срока с интервалом 33–40 лет (табл. 1).

Далее было выполнено дешифрирование границы ЦФ с прилегающей водораздельной поверхностью, и для выполнения анализа были определены число ЦФ для каждого срока. Наконец, на последнем этапе выполнялись определение средней плотности расположения и среднего размера ЦФ для каждого участка и для каждого срока и анализ полученных данных.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты математического моделирования изменения расположения и размеров ЦФ абразионных берегов криолитозоны в итоге показали, что изменение средней плотности расположения ЦФ и среднего размера ЦФ должны подчиняться следующим зависимостям:

$$\gamma(u) = \frac{2 - e^{-\lambda a u}}{a} \text{ и } h(u) = \frac{a}{2 - e^{-\lambda a u}}. \quad (24)$$



Рис. 3. Карта расположения ключевых участков.

Fig. 3. Location map of key sites

Был выполнен анализ результатов моделирования. Анализ выражений показывает, что средний размер ЦФ во времени монотонно уменьшается, а средняя линейная плотность расположения монотонно увеличивается.

При большом времени развития средняя линейная плотность расположения ЦФ стремится к предельному значению:

$$\gamma(\infty) = 2/a, \quad (25)$$

т.е. при большом времени развития средняя линейная плотность расположения ЦФ увеличивается вдвое по сравнению с исходным моментом, когда циркуобразные формы были разобщены, и частичного или полного стирания не происходило. Так как средняя линейная плотность расположения и средний размер ЦФ являются взаимно обратными величинами, то средний размер ЦФ (хорда дуги) также стремится к предельной величине, уменьшаясь вдвое:

$$h(\infty) = a/2. \quad (26)$$

Полученные два результата показывают, что при повторном измерении средней плотности расположения ЦФ в подавляющем большинстве случаев должно наблюдаться их уменьшение, а на поздних этапах развития — практическая стабилизация, конечно, исключая статистические флуктуации.

Таким образом можно сделать вывод, что при значительном времени развития, хотя береговой склон все время изменяется, происходит появление новых ЦФ, частичное или полное стирание уже существующих, но при этом средняя линейная плотность расположения ЦФ и средний размер стабилизируются, стремясь к предельным значениям. Иначе говоря, получены признаки того, что по прошествии значительного времени морфологическая структура абразионного берега оказывается в состоянии динамического равновесия; окончательное решение этого вопроса требует анализа в целом поведения распределения размеров ЦФ, а не только среднего значения размера.

Выполненные работы на ключевых участках позволили получить численные значения средней плотности расположения и размеров ЦФ за два срока с интервалом 33–40 лет (табл. 2).

Проведенный анализ позволяет заключить, что средняя линейная плотность расположения ЦФ меняется по участкам, составляя от 6 до 38 ЦФ на 1 км береговой линии. Средние размеры ЦФ при этом колеблются в интервале 27–144 м. Средняя линейная плотность расположения ЦФ на участке п-овов Ямал и Гыдан выше, чем на любом из исследованных участков п-ова Канин. Видимо, выявленные различия следует объяснять разницей

Таблица 1. Характеристика использованной спутниковой съемки**Table 1.** Characteristics of the satellite imagery

Участок	Характеристики съемки					
	Срок 1			Срок 2		
	Дата	Спутник	Разрешение, м/пикс	Дата	Спутник	Разрешение, м/пикс
КНС-1	20.08.1980	Corona	1.2	18.07.2020	WorldView 3	0.3
КНС-2	20.08.1980			10.06.2013	GeoEye 1	0.5
КНС-3	22.08.1980			10.06.2013		
КНС-4	23.08.1980			29.07.2017	WorldView 2	
ЯМЛ-1	26.07.1982			20.08.2019	WorldView 3	0.3
ГДН-2	11.07.1979			14.06.2016	WorldView 2	0.5

Таблица 2. Значения средней плотности расположения и размеров циркуобразных форм за два срока**Table 2.** Average density and size of thermal cirques for two periods

Участок	Протя- женность участка, км	Срок 1 (Corona)			Срок 2		
		Число ЦФ	Средняя плотность расположения, км ⁻¹	Средний размер, км	Число ЦФ	Средняя плотность расположения, км ⁻¹	Средний размер, км
КНС-1	10.4	64	6.2	0.163	72	6.9	0.144
КНС-2	11.8	214	18.1	0.055	290	24.6	0.041
КНС-3	5.4	165	30.6	0.033	176	32.6	0.031
КНС-4	11.9	160	13.4	0.074	159	13.4	0.075
ЯМЛ-1	2.9	109	37.6	0.027	108	37.2	0.027
ГДН-2	8.6	298	34.7	0.029	319	37.1	

локальных физико-географических и геокриологических условий различных участков.

Анализ также показывает, что на 3 участках между сроками наблюдается уменьшение среднего размера ЦФ на 1–19 м и увеличение их плотности расположения на 0.7–6.5 км⁻¹. Скорости изменения средних размеров составляют 0.6–4.8 м за 10 лет³ (табл. 3). На двух участках наблюдается 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.

³ Нормирование на 10 лет использовано для удобства восприятия средней скорости изменения размеров на участках и естественно не характеризует скорость изменения среднего размера за каждый год на соответствующем десятилетнем интервале.

Таким образом, анализ материалов повторных космических съемок на 6 участках абразионных берегов показал, что на трех наблюдается уменьшение средних размеров ЦФ и рост плотности расположения, а на трех – практическое постоянство значений параметров, это находится в согласии с полученными результатами моделирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение процессов изменения плотности расположения ЦФ абразионных морских берегов в криолитозоне показало, что в нем сочетаются противоположные тенденции, с одной стороны, уменьшения числа ЦФ за счет стирания более старых ЦФ новыми возникающими, с другой – роста их числа из-за возникновения новых ЦФ внутри

Таблица 3. Скорость изменения средней плотности расположения и размеров циркообразных форм
Table 3. Rate of change in the average density and size of thermal cirques

Участок	Срок съемки 1	Срок съемки 2	Интервал между съемками, лет	Скорость изменения средней плотности расположения за 10 лет, 1/км	Скорость изменения среднего размера за 10 лет, м
КНС-1	1980	2020	40	0.2	–4.8
КНС-2		2013	33	2.0	–4.2
КНС-3				0.6	–0.6
КНС-4		2017	37	–0.0	0.3
ЯМЛ-1	1982	2019	37	–0.1	0.0
ГДН-2	1979	2016	37	0.6	

контуров существующих с увеличением их количества за счет деления, а также за счет появления новых ЦФ; на развитие процесса оказывают также влияние случайные вариации размеров возникающих молодых ЦФ.

Анализ изменения средней плотности расположения и средних размеров ЦФ на основе математической модели их морфологической структуры показал, что в однородных физико-географических условиях должно происходить монотонное увеличение средней плотности расположения ЦФ и уменьшение их средних размеров.

При значительном времени развития, как показывает моделирование, средняя линейная плотность расположения и средний размер ЦФ стремятся к некоторым предельным значениям, хотя при этом сам береговой склон, отступая все время изменяется, происходит появление новых ЦФ, частичное или полное стирание уже существующих; таким образом, по прошествии значительного времени развития отмечаются признаки того, что морфологическая структура абразионного берега оказывается в состоянии динамического равновесия.

Анализ материалов повторных космических съемок на шести участках абразионных берегов показал, что на трех наблюдается уменьшение средних размеров ЦФ и рост плотности расположения, а на трех — практическое постоянство значений параметров согласно полученным результатам моделирования.

Безусловно, полученные результаты относятся к схематизированным условиям относительно однородного берега (что отчасти сглаживается вероятностным подходом, учитывающим изменчивость) и к относительно слабому изменению климатических условий. Однако, с нашей точки зрения, результаты имеют определенное значение, так как хотя и описывают поведение исследуемой мор-

фологической структуры в однородных и постоянных условиях, но могут послужить основой для рассмотрения более сложных случаев путем варьирования параметров используемых распределений.

Полученные закономерности должны учитываться при прогнозе динамики арктических берегов на основе использования материалов космических съемок.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено в рамках госзадания, тема № FMWM-2022-0010.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 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. 21. № 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.
- Викторов А.С. (2022) Моделирование морфологических особенностей абразионных берегов с развитием оползневых процессов в криолитозоне. *Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология*. № 6. С. 28–36.
<https://doi.org/10.31857/S0869780922060078>
- 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>
- Кизяков А.И. (2005) Динамика термоденудационных процессов на побережье Югорского полуострова. *Криосфера Земли*. Т. IX. № 1. С. 63–67.

- 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. В сб.: *Современные исследования трансформации криосферы и вопросы геотехнической безопасности сооружений в Арктике: сборник трудов конференции*. Салехард: Институт криосферы Земли СО РАН. С. 246–249. <https://doi.org/10.7868/9785604610848>
- Нестерова Н.Б., Хомутов А.В., Лейбман М.О. и др. (2021) Инвентаризация циркуобразных форм 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. 26 с.
- 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. В сб.: *Материалы XXV Международной береговой конференции “Береговая зона – взгляд в будущее”*. М.: ГЕОС. С. 114–117.
- Пижанкова Е.И., Добрынина М.С. (2010) Динамика побережья Ляховских островов (результаты дешифрирования аэрокосмических снимков). *Криосфера Земли*. Т. XIV. № 4. С. 66–79.
- Пижанкова Е.И. (2011) Термоденудация в береговой зоне Ляховских островов (результаты дешифрирования аэрокосмических снимков). *Криосфера Земли*. Т. XV. № 3. С. 61–70.
- Совершаев В.А. (1998) Криогенные процессы и явления на побережье и шельфе арктических морей. В сб.: *Динамика арктических побережий России*. М.: Изд-во МГУ. С. 12–18.
- Хомутов А.В., Лейбман М.О. (2008) Ландшафтные факторы изменения скорости ермоденудации на побережье Югорского полуострова. *Криосфера Земли*. Т. XII. № 4. С. 24–35.
- 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. Iss. 20. 4042. <https://doi.org/10.3390/rs13204042>

REGULARITIES OF CHANGE FOR LOCATION DENSITY AND SIZE CHANGES OF THERMAL CIRQUES OF THE ABRASION SHORES WITHIN THE CRYOLITHOZONE BASED ON REMOTE SENSING DATA⁴

A. S. Victorov^{a, #}

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

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

The aim of this research is to determine the changes through time of the quantitative parameters of the thermal cirques along the abrasive coasts within the cryolithozone. The analysis of the processes revealed two opposite trends; a decrease in the number of the thermal cirques along the cryolithozone coastlines due to replacement of the older thermal cirques with new ones, and an increase in their number due to the emergence of new ones within the existent forms. This increase results from their division and the display of the new thermal cirques. Based on the calculated average density and size of the thermal cirques the model predicted that under the homogeneous physical geographical conditions the average density of thermal cirques along the abrasive coasts within the cryolithozone should increase with time, while the average size should decrease. The local physical and geocryological conditions influence the values of the dependence parameters, but their relationship remains the same. An examination of the obtained dependence showed that with time, the density and average size of the thermal cirques tend to reach critical limiting values. At the same time the retreating coastal slope continue to change, new thermal cirques appear, and partial or complete disappearance of the existing ones occurs. Thus, after a significant period of development, the morphology of the abrasive coast may reach a state of dynamic equilibrium. Analysis of six abrasive coasts using repeated satellite imagery showed an increase in density and a decrease in average sizes of the thermal cirque along three of them, and an apparent stability of parameters along the other three coasts, which is in an agreement with the obtained modeling results. The obtained regularities should be used when forecasting the dynamics of the Arctic coasts based on satellite imagery.

Keywords: mathematical morphology of landscapes; abrasive coasts; thermal cirques; mathematical models of morphological patterns; remote sensing data

⁴ *For citation:* Victorov A. S. (2025) Regularities of change for location density and size changes of thermal cirques of the abrasion shores within the cryolithozone based on remote sensing data. *Geomorfologiya i Paleogeografiya*. Vol. 56. No. 2. P. 251–261 (in Russ). <https://doi.org/10.31857/S2949178925020054>; <https://elibrary.ru/GPVOCR>

ACKNOWLEDGMENTS

The study was carried out for the state assignment No. FMWM-2022-0010.

REFERENCES

- 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. 21. No. 6. P. 73–83.
[https://doi.org/10.21782/EC1560-7496-2017-6\(73-83\)](https://doi.org/10.21782/EC1560-7496-2017-6(73-83))
- Khomutov A.V., Leibman M.O. (2008) Landscape controls of thermodenudation rate change on Yugorsky Peninsula Coast. *Kriosfera Zemli*. Vol. XII. No. 4. P. 24–35 (in Russ).
- Kizyakov A.I. (2005) The dynamics of thermodenudation processes at the Yugorsky Peninsula coast. *Kriosfera Zemli*. Vol. IX. No. 1. P. 63–67 (in Russ).
- 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 Sens*. Vol. 13. Iss. 20. 4042.
<https://doi.org/10.3390/rs13204042>
- Nesterova N.B., Khomutov A.V., Leibman M.O. et al. (2021) Inventory of retrogressive thaw slumps (thermocirques) in the north of West Siberia based on 2016–2018 satellite imagery mosaic. *Kriosfera Zemli*. Vol. XXV. 6. P. 34–41 (in Russ).
- Novikova A.V. (2022) Morfologiya i dinamika termabrazionnykh beregov Karskogo morya (Morphology and dynamics of thermal abrasion coasts of the Kara Sea). PhD thesis. Moscow: MGU. 26 p. (in Russ.).
- Ogorodov S.A., Arkhipov V.V., Baranskaya A.V. et al. (2014) Technogenic factor of the dynamics of the coasts of the Pechora and Kara Seas in the context of climate change and ice cover. In: *Materialy XXV Mezhdunarodnoy beregovoy konferentsii "Beregovaya zona – vzglyad v budushcheye"*. Moscow: GEOS (Publ.). P. 114–117 (in Russ).
- Pizhankova E.I., Dobrynina M.S. (2010) The dynamics of the Lyakhovsky Islands coastline (results of aerospace image interpretation). *Kriosfera Zemli*. Vol. XIV. No. 4. P. 66–79 (in Russ).
- Pizhankova E.I. (2011) Thermodenudation in the coastal zone of the Lyakhovsky Islands (interpretation of aerospace images). *Kriosfera Zemli*. Vol. XV. No. 3. P. 61–70 (in Russ).
- Sovershayev V.A. (1998) Cryogenic processes and phenomena on the coast and shelf of the Arctic seas. In: *Dinamika arkticheskikh poberezhii Rossii*. Moscow: MGU (Publ.). P. 12–18 (in Russ).
- Vasiliev A.A., Pokrovsky S.I., Shur Yu.L. (2001) Dynamics of the coastal thermoerosion of West Yamal. *Kriosfera Zemli*. Vol. V. No. 1. P. 44–52 (in Russ).
- Victorov A.S., Orlov T.V., Arkhipova M.V. et al. (2023) Quantitative laws of a morphological 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 (in Russ). <https://doi.org/10.31857/S294917892303012X>