

## **СКОРОСТЬ ТЕРМОАБРАЗИИ МОРСКИХ БЕРЕГОВ КАК ФУНКЦИЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ И МОРФОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОБЕРЕЖЬЯ**

### **Введение**

Воздействие атмосферы и моря на арктические берега, сложенные дисперсными многолетнемерзлыми породами, активизирует береговые криогенные процессы, развитие которых отрицательно сказывается на инженерно-геокриологической обстановке в береговой зоне. В условиях интенсивного хозяйственного освоения арктического побережья и в связи с предполагаемыми изменениями климата Арктики оценка и прогнозирование темпов разрушения термоабразионных берегов приобретают особое значение.

Процессы разрушения термоабразионных берегов тесно связаны с геолого-геоморфологической и геокриологической обстановками и протекают на фоне непрерывно меняющихся климатических и гидродинамических условий. Анализ имеющихся фактических данных и материалов ряда научных публикаций [1–7] показывает, что закономерности развития морских льдистых берегов определяются не только их мерзлотно-геологическим строением, но также гидрометеорологическими процессами и морфометрическими характеристиками побережья. Темп термоабразионного рельефообразования в береговой криолитозоне зависит от множества действующих там экзогенных факторов – сгонно-нагонных колебаний уровня моря, ветро-волнового и ледникового режимов, продолжительности безледного периода, циркуляции вод, гидрологических характеристик.

К сожалению, большинство приводимых в литературе безусловно ценных сведений по скорости термоабразии не увязаны с основными факторами, от которых зависит темп разрушения берегов [2]. Следовательно, возможности использования их для изучения закономерностей динамики береговой криолитозоны и прогнозирования скорости отступления берегов весьма ограничены.

Степень прямого или опосредованного влияния каждого из перечисленных выше факторов на динамику берегов численно определить очень сложно, так как почти все они зависимы друг от друга. Между тем, именно это обстоятельство позволяет количественно оценить и даже прогнозировать совместное воздействие указанных факторов на термоабразионные берега, если рассматривать их взаимоотношения между собой и с береговыми многолетнемерзлыми породами в рамках единой природной системы "атмосфера – море – береговая криолитозона", в которой они функционально взаимосвязаны.

### **Критерии и условия реализации термоабразионного процесса**

Располагая фактическими данными о темпах отступления различных по морфологии и мерзлотно-геологическому строению термоабразионных берегов в различных гидрометеорологических условиях, можно экспериментально установить зависимость скорости термоабразии от продолжительности метеогидродинамических обстановок, при которых высокие ветровые нагоны сочетаются с сильным волнением, направленным в сторону берега, и величины секундных потоков волновой энергии. При этом будет учитываться влияние на темп отступления берегов относительного положения границы дрейфующих льдов и глубины моря.

В качестве численных критериев выделения таких метеогидродинамических обстановок из весьма разнообразных и сложных гидрометеорологических условий прибрежных районов арктических морей целесообразно использовать характеристики ветра, по которым имеются достаточно полные ряды наблюдений на полярных метеостанциях. Амплитуда сгонно-нагонных колебаний уровня моря, параметры волн и величина потока волновой энергии зависят от скорости и направления ветра, длины разгона волны и глубины акватории на участках развития волнения [8]. Поэтому продолжительность процесса разрушения термоабразионных берегов определяется суммарной повторяемостью в безледный период ветров, создающих условия для реализации механизма термоабразии.

На основе материалов комплексных исследований, проведенных автором или с его участием в 1984–1988 и 1990–1993 гг. во время морских работ ПГО "Якутскгеология" и экспедиционных работ Института мерзлотоведения СО РАН на одном и том же участке побережья и акватории Восточно-Сибирского моря в районе мыса Крестовского, расположенного к западу от устья р. Колымы, с привлечением данных метеостанций бухты Амбарчик и острова Четырехстолбового между основными гидродинамическими факторами термоабразии и ветровыми характеристиками установлены зависимости, с помощью которых можно оценивать интенсивность и продолжительность совместного воздействия этих факторов на берега.

Так, по наблюдениям в районе мыса Крестовского, разрушение термоабразионных берегов восточных экспозиций под воздействием моря отмечается только при ветрах северо-восточной четверти горизонта, скорость которых превышает 10 м/с, и достаточной для развития волн и нагонов протяженности пространства открытой воды, составляющей не менее нескольких десятков километров по направлению ветра. Ветры указанных направлений и скорость 10–20 м/с вызывают здесь нагоны, высота которых, по нашим наблюдениям, достигает 1,2–1,5 м относительно среднего уровня моря. При этом на свободных от льда участках акватории с глубинами более 10 м развиваются волны высотой до 1,5–2 м и длиной до 17–25 м. Предельные значения рассматриваемых гидродинамических характеристик, приведенные в лоции Восточно-Сибирского моря для исследуемого района, составляют: по высоте нагонов – 2,1 м, по высоте и длине волн – 2,5 и 30 м соответственно.

Продолжительность процесса термоабразии берегов в районе мыса Крестовского за год равна суммарной продолжительности действия северных и северо-восточных ветров скоростью более 10 м/с в течение безледного времени, определяемой, как уже упоминалось, по суммарной повторяемости этих ветров, и, например, в 1936–1956 гг. составляла в среднем 82 ч, в 1956–1972 гг. – 58 ч, в 1972–1988 гг. – 76 ч и в 1990–1993 гг. – около 100 ч.

Таким образом, на темп разрушения берегов влияют климатические условия, которые в указанные интервалы лет заметно различались. Кроме того, продолжительность и темп термоабразии зависят от экспозиции разрушаемых берегов, так как при изменении последней меняются направления и, следовательно, значения повторяемости ветров, при действии которых происходит термоабразия.

### Показатель абразионной активности

Из теории развития морских берегов [9, 10] следует, что темп их отступления пропорционален произведению продолжительности ( $T$ ) условий, при которых происходит разрушение береговых уступов, и среднего в единицу времени потока волновой энергии ( $E$ ), индуцируемого ветром в этих условиях:

$$V_{та} \sim T \cdot E. \quad (1)$$

Ежегодная продолжительность термоабразионного процесса значительно меньше продолжительности безледного времени омывающих берега акваторий, поэтому произведение  $T \cdot E$  можно условно называть абразионной активностью берегов. Тогда продолжительность термоабразии берегов в течение года будет определяться соотношением

$$T = \frac{T_{бл} \cdot P_{\Sigma}}{100}, \quad (2)$$

где  $T_{бл}$  – продолжительность безледного времени в пределах рассматриваемой акватории,  $P_{\Sigma}$  – суммарная повторяемость ветров, создающих условия для термоабразии берегов, в % от общего числа случаев с ветром разных направлений и скоростей, включая случаи со штилем.

С учетом выражения коэффициента безледного времени  $K_{бл} = T_{бл} \cdot 100/365$  [11], соотношение (2) принимает вид:

$$T = 0,365 \cdot K_{бл} \cdot P_{\Sigma}. \quad (3)$$

Для количественной характеристики секундных потоков волновой энергии на единицу длины фронта волны воспользуемся известной формулой [8]:

$$E = \frac{1}{16} \cdot \rho \cdot g \cdot \frac{h^2 \cdot \lambda}{\tau}, \quad (4)$$

$\rho$  – плотность воды,  $g$  – ускорение свободного падения,  $h$ ,  $\lambda$  и  $\tau$  – средняя высота, длина и период волны. Подставим в (4) эмпирические формулы

$$h = a \cdot V \cdot X^{1/3}, \quad \lambda = z \cdot V \cdot X^{1/3} \quad \text{и} \quad \tau = \eta \cdot \sqrt{\lambda},$$

полученные Шишовым [12] для мелководных районов морей. Тогда

$$E = \frac{1}{16} \cdot \rho \cdot g \cdot \frac{a^2 \cdot z^{0,5}}{\eta} \cdot V^{2,5} \cdot X^{0,8}. \quad (5)$$

Здесь:  $V$  – средняя скорость ветра, под действием которого реализуется термоабразионный процесс; м/с;  $X$  – длина разгона волн, км,  $a$ ,  $z$  и  $\eta$  – эмпирические коэффициенты, учитывающие влияние глубины моря на характеристики волнения.

Если энергию волн измерять в тонно-метрах, продолжительность термоабразии – в секундах и учесть, что в климатических справочниках повторяемость ветров обычно приводится по градациям скоростей с интервалом 3–4 м/с, то

$$T \cdot E = 1,93 \cdot 10^3 \cdot K_{бв} \cdot K_H \cdot X^{0,8} \cdot \sum_{i=1}^n P_i V_i^{2,5}, \quad (6)$$

где  $n$  – число градаций скоростей ветра более 10 м/с,  $P_i$  – повторяемость  $i$ -той градации скоростей,  $V_i$  – скорость ветра в  $i$ -той градации.  $K_H = a^2 \cdot z^{0,5} / \eta$  – коэффициент, характеризующий влияние глубины прибрежных участков моря на абразионную активность берегов.

При среднем многолетнем положении границы сплоченных дрейфующих льдов, когда ближайшее расстояние от нее до мыса Крестовского, по данным ледовых разведок Певекского управления гидрометеослужбы, составляет во второй половине июля – сентябре 70–100 км, на открытом пространстве акватории вдоль направлений северного и северо-восточного ветров преобладают глубины 6...9 м, для которых  $K_H$  составляет  $5,14 \cdot 10^{-4}$ . Во время относительных похолоданий в Арктике граница дрейфующих льдов располагается летом в 40–50 км от береговой линии. На свободной от льдов площади акватории преобладают глубины 4...7 м, которым соответствует значение коэффициента  $3,4 \cdot 10^{-4}$ . В годы с наиболее тяжелыми ледовыми условиями глубина на участке открытой воды, прослеживаемой вдоль береговой линии узкой, шириной 15–20 км, полосой, не превышает 4 или 5 м, а коэффициент глубины принимает значение  $1,78 \cdot 10^{-4}$ .

Для сравнительных оценок темпов отступления берегов на разных участках побережья или в разные годы на одном и том же участке берега удобно пользоваться отношением абразионной активности какого-либо изучаемого участка берега ( $T \cdot E$ ) к абразионной активности экспериментального участка ( $\bar{T} \cdot \bar{E}$ ), которая в конкретных интервале времени и координатах (например, на мысе Крестовском в 1990–1993 гг.) увязана с данными натурных наблюдений за темпом термоабразии берегов с различными морфометрическими и мерзлотно-геологическими характеристиками и является, таким образом, величиной постоянной. Следовательно, скорость разрушения берегов будет пропорциональна этому отношению, для которого впервые в [13] было предложено ввести понятие "показатель абразионной активности берегов" и выражение

$$\Pi_a = \frac{T \cdot E}{\bar{T} \cdot \bar{E}} = \frac{K_{бв} \cdot K_H \cdot X^{0,8} \cdot \sum_{i=1}^n P_i V_i^{2,5}}{\bar{K}_{бв} \cdot \bar{K}_H \cdot \bar{X}^{0,8} \cdot \sum_{j=1}^m \bar{P}_j \bar{V}_j^{2,5}}. \quad (7)$$

Число и интервалы градаций скоростей ветра сравниваемых участков берегов могут не совпадать с таковыми экспериментального участка, поэтому для выражения абразионной активности последнего используются индексы  $m$  и  $j$ .

Показатель абразионной активности является безразмерной величиной, количественно характеризующей совместное влияние на динамику берегов гидродинамических процессов, продолжительности безледного времени, глубины освобождаемых в летний сезон от льда прибрежных районов акваторий и дрейфующих льдов, и отражает относительную потенциальную интенсивность термоабразии конкретных участков берегов в конкретные

Величина показателя абразионной активности в некоторых районах восточно-арктического побережья в различные временные интервалы

Район наблюдений	Годы	$P$	$\Sigma P \cdot V^{2.5}$	$K_{об}$	$X$	$K_n \cdot 10^4$	$\Pi_a$
Мыс Крестовский	1936–1956	5,33	3453,02	18	70	5,14	0,83
То же	1956–1972	3,70	2179,55	18	40	3,38	0,22
"	1972–1988	4,82	3142,56	18	70	5,14	0,75
"	1990	2,66	1757,71	18	70	5,14	0,42
"	1956–1990	4,28	2677,46	18	55	4,28	0,44
"	1990–1993	6,30	4163,00	18	70	5,14	1,00
"	1956–1993	4,43	2789,31	18	60	4,30	0,49
Северный берег острова Семеновский	1936–1956	6,57	4209,79	20	90	6,71	1,79
Западный берег полуострова Широкостан	То же	4,50	2909,88	20	70	5,14	0,78
Юго-восточный берег Ванькиной губы	"	4,50	2909,88	20	10	5,14	0,16
Морские берега дельты р. Яны	"	6,57	4209,79	20	70	5,14	1,12
Мыс Барроу	"	7,91	6490,15	12	50	5,14	0,79

интервалы времени. Его пространственно-временные вариации соответствуют изменениям климатических условий, с одной стороны, и сопровождаются согласованными изменениями темпов термоабразии по протяжению береговой линии арктических морей и во времени, с другой стороны.

Понятие "показатель абразионной активности берегов" близко по смыслу к условному термину "энергия береговых процессов", предложенному Прайсом [8]. Никаких численных критериев энергии береговых процессов, в понятие которой включаются проявление действия волнения, течений и колебаний уровня моря, не выработано. В отличие от энергии береговых процессов, показатель абразионной активности имеет числовое выражение (табл. 1). Практически для любого района арктического побережья его значение можно вычислить, располагая батиметрическими картами, данными стационарных гидрометеорологических наблюдений и материалами ледовых разведок.

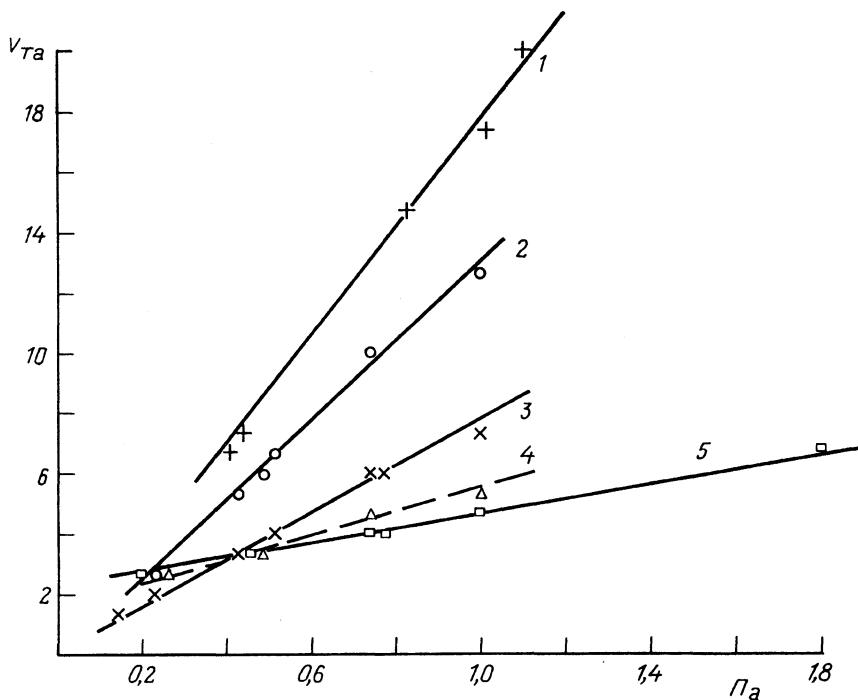
Приведенные в таблице величины показателя абразионной активности рассчитаны по формуле (7). При выборе численных значений входящих в формулу параметров для расчета показателя в районах побережья морей Лаптевых и Бофорта использовались материалы научных публикаций [4, 5, 11, 14–17].

### Скорость термоабразии берегов как функция показателя абразионной активности

Фактической основой анализа зависимости между темпом разрушения берегов и показателем абразионной активности послужили данные инструментальных измерений величин отступления береговых уступов на экспериментальном участке побережья, результаты сопоставления положения береговой линии этого же участка в 1990 г. с ее очертанием на аэрофотоснимках залета 1952 г., литературные сведения по средней многолетней скорости термоабразии берегов в районе мыса Крестовского [2, 18] и в некоторых других районах восточно-арктического побережья [4, 5, 14, 19], где можно было увязать эти сведения с гидродинамическими и климатическими характеристиками.

Все имеющиеся данные по скорости отступления термоабразионных берегов осреднены по интервалам высот клифов и сведены по интервалам лет в табл. 2. Береговые уступы с высотами от 0,7 до 10–12 м сложены голоценовыми озерно-термокарстовыми отложениями, а с высотами более 12 м – позднплейстоценовым ледовым комплексом. По материалам табл. 1 и 2 построены графики зависимости скорости термоабразии от показателя абразионной активности для представленных интервалов высот клифов (рисунок). Вид этих графиков свидетельствует о прямо пропорциональной связи:

$$V_{та} = k \cdot \Pi_a \quad (8)$$



Графики зависимости скорости отступления термоабразионных берегов ( $V_{та}$ , м/год) от показателя абразионной активности ( $\Pi_a$ ) для клифов высотой; 1 — 0,7–1,5 м; 2 — 1–2 м; 3 — 4–7 м; 4 — 8–10 м, 5 — 12–20 м

где  $k$  — коэффициент пропорциональности, который сам является функцией высоты и мерзлотно-геологического строения берегов и имеет размерность м/год. По нашим расчетам, его величина меняется от 3,75 для клифов высотой около 30 м, сложенных ледовым комплексом, до 17,411 для низких (высотой 0,7–1,5 м) берегов с нарушенным покровом дерна, сложенных озерно-термокарстовыми породами.

Рассматривая показанные на рисунке графики зависимости (8), можно отметить, что даже при относительно малых значениях показателя абразионной активности темп отступления бровки береговых уступов высотой менее 6–7 м контролируется процессом термоабразии.

Скорость отступления бровки берегов высотой более 7–8 м определяется интенсивностью термоабразионного процесса лишь в случае, когда величина показателя превышает 0,5–0,6. При этом берега разрушаются, а их бровка отступает в результате размыва основания уступа и обрушивания блоков мерзлых пород с растительно-дерновым слоем на поверхности, наличие которого свидетельствует о том, что термоабразия развивается значительно интенсивнее, чем термоденудация.

Если показатель абразионной активности принимает значения менее 0,5, темп отступления верхней части клифов будет определяться интенсивностью термоденудации, средняя скорость которой для высоких термоабразионных берегов с углами откоса 80–90° в районе мыса Крестовского, по наблюдениям автора, достигает 3,5–3,7 м/год. В этом случае волнами и течениями размывается оттаявший и сплывший к урезу моря обломочный материал, который перекрывает мерзлые породы в подошве уступа и в какой-то мере затрудняет их размыв, т.е. абразия лишь способствует термоденудации. С уменьшением показателя абразионной активности от 0,5 до 0,2 скорость термоденудационного отступления бровки берега снижается от 3,5–3,7 до 2,4–3 м в год и при значениях показателя менее 0,15–0,2 несколько превышает даже темп термоабразии низких берегов.

Интенсивность разрушения берегов с нарушением растительно-дерновым слоем примерно в 1,5 раза выше скорости термоабразии аналогичных берегов с ненарушенным дерновым покровом. Обширные площади с нарушенным дерновым слоем возникают на

Средняя скорость отступления берегов (м/год) с различными морфометрическими и мерзлотно-геологическими характеристиками

Интервалы лет	Высота клифов, м						Источники
	0,7–1,5 <sup>1</sup>	1–2	4–7	8–10	12–20	30–40	
1936–1950					7,1		[4]
1936–1956	15,0						[18]
1951–1953	20,0						[14]
1951–1974					4,0	3,0	[19]
1951–1974			1,5			0,8	[5]
1952–1972		2,3	1,6	2,4	3,0		[2]
1952–1990	7,5	5,8	3,6	3,4	3,5		Результаты измерений в районе мыса Крестовского
1990	7,0	5,3	3,4				То же
1990–1993	17,4	13,0	7,3	5,5	4,8		"
1952–1993		6,4	4,0	3,5	3,5		"

<sup>1</sup> берега с нарушенным растительно-дерновым покровом на обширной площади.

побережье, например, при пересечении крупных озер береговой линией моря в процессе термоабразии, а также в результате воздействия техногенных факторов на поверхность тундры при хозяйственном освоении арктических районов.

### Заключение

Итак, показатель абразионной активности, впервые предложенный автором для количественного описания динамики термоабразионных берегов, характеризует степень воздействия комплекса климатических и гидродинамических факторов на отмытые береговые уступы. Использование этого показателя в указанных целях значительно облегчает решение задачи отыскания такого математического выражения, которое для любой точки береговой линии с учетом ее морфометрических и мерзлотно-геологических характеристик, а также изменений климатических условий давало бы величину скорости отступления клифов под механическим и тепловым воздействием моря.

Скорость отступления термоабразионных берегов прямо пропорционально зависит от показателя абразионной активности. Эта функциональная зависимость выражена математической формулой, в которой посредством коэффициента пропорциональности учитывается влияние высоты и мерзлотно-геологического строения клифов на скорость их разрушения и которую можно использовать в моделировании динамики термоабразионных берегов по различным сценариям изменений климата.

Сам факт существования прямо пропорциональной зависимости (8) свидетельствует о высокой чувствительности термоабразионного процесса к изменчивости климатических условий в целом и о существенном влиянии на скорость термоабразии изменений циркуляции атмосферы в частности. Следовательно, упомянутая зависимость может лечь в основу долгосрочного прогнозирования темпов отступления морских термоабразионных берегов в связи с предполагаемыми изменениями климата в Арктике, поскольку входящие в показатель абразионной активности климатические характеристики с той или иной точностью предсказываются гидрометеослужбой. Кроме того, математическое выражение показателя (7) позволяет численно установить относительную величину вклада каждого фактора в термоабразионный процесс на конкретном участке побережья, что имеет важное значение как для моделирования динамики береговой криолитозоны, так и для составления прогнозов скорости термоабразии берегов.

Результаты проведенных исследований позволяют сделать вывод о том, что неупорядоченная, случайная, на первый взгляд, пространственно-временная изменчивость темпов разрушения берегов арктических морей подчинена вполне определенным закономерностям и в значительной степени обусловлена изменениями циркуляционных характеристик климата.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арэ Ф.Э. Термоабразия морских берегов. М.: Наука, 1980. 158 с.
2. Арэ Ф.Э. Основы прогноза термоабразии берегов. Новосибирск: Наука, 1985. 171 с.
3. Григорьев Н.Ф. Роль криогенных факторов в формировании морских берегов Якутии // Многолетнемерзлые породы и сопутствующие им явления на территории Якутской АССР. М.: Изд-во АН СССР, 1962. С. 68–78.
4. Жигарев Л.А., Совершаев В.А. Термоабразионное разрушение арктических островов // Береговые процессы в криолитозоне. Новосибирск: Наука, 1984. С. 31–37.
5. Новиков В.Н. Морфология и динамика берегов Ванькиной Губы моря Лаптевых // Береговые процессы в криолитозоне. Новосибирск: Наука, 1984. С. 20–27.
6. Шуйский Ю.Д. О воздействии сильных штормов на песчаные берега восточной Балтики // Океанология. 1969. № 3. С. 475–478.
7. Шеко А.И., Круподеров В.С., Дьяконова В.И. Активизация абразии в Крыму // Береговая зона моря. М.: Наука, 1981. С. 108–112.
8. Морская геоморфология. Терминологический справочник / Под ред. В.П. Зенковича и Б.А. Попова. М.: Мысль, 1980. 280 с.
9. Леонтьев О.К. Основы геоморфологии морских берегов. М.: Изд-во МГУ, 1961. 418 с.
10. Зенкович В.П. Основы учения о развитии морских берегов. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 710 с.
11. Совершаев В.А. Влияние морских льдов на развитие криолитозоны арктического шельфа (на примере восточных арктических морей) // Криолитозона арктического шельфа. Якутск: Ин-т мерзлотоведения СО АН СССР, 1981. С. 70–83.
12. Шишов Н.Д. К вопросу о расчете элементов ветровых волн на ограниченной глубине // Метеорология и гидрология. 1949. № 1. С. 65–75.
13. Разумов С.О. Динамика морских термоабразионных берегов в связи с особенностями мерзлотно-климатических условий (на примере Колымского залива Восточно-Сибирского моря): Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М.: Ин-т мерзлотоведения СО РАН, 1996. 24 с.
14. Григорьев Н.Ф. Многолетнемерзлые породы приморской зоны Якутии. М.: Наука, 1966. 180 с.
15. Суховой В.Ф. Моря Мирового океана. Л.: Гидрометеоздат, 1986. 287 с.
16. Hume J.D., Schalk M. The effects of ice on the beach and nearshore; point Barrow, Arctic Alaska // Rev. Geogr. Montreal. 1976. № 1–2. P. 105–114.
17. Климатологический справочник Советской Арктики. Л.: Изд-во "Морской транспорт". 1961. Часть II. Т. 232. 306 с.
18. Лапина Н.Н. Литодинамика Северного Ледовитого океана // Геология прибрежных зон моря. Л.: НИИГА, 1977. С. 56–64.
19. Новиков В.Н. Новые данные о темпе отступления термоабразионных берегов // Береговая зона моря. М.: Наука, 1981. С. 133–135.

Ин-т мерзлотоведения СО РАН, Якутск

Поступила в редакцию  
23.03.99

## THERMAL ABRASION RATE AT THE SEA SHORE AS THE FUNCTION OF ITS CLIMATIC AND MORPHOLOGIC CHARACTERISTICS

RASUMOV S.O.

### S u m m a r y

The results of comprehensive investigation of thermal abrasion banks of East-Siberian Sea are described. The author firstly used the abrasion activity parameter for numerical evaluation of integrated impact of hydrometeorological factors on icy seashores. The rate of icy shore recession is in direct ratio to the value of this parameter according to the formula obtained. The influence of morphological and frost characteristics of cliffs on the rate of their destruction is taken into consideration. The formula may be used in cryogenic processes modeling and for the forecasting of the icy shore recession as the result of climatic changes.