

КРИОГЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ И ОБРАЗОВАНИЯ

УДК 551.468.1:551.345.2:912.412

**ТЕРМОДЕНУДАЦИЯ В БЕРЕГОВОЙ ЗОНЕ ЛЯХОВСКИХ ОСТРОВОВ
(РЕЗУЛЬТАТЫ ДЕШИФРИРОВАНИЯ АЭРОКОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ)**

Е.И. Пижанкова

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический ф-т,
119992, Москва, Ленинские горы, Россия, eipjankova@rambler.ru*

Приведены результаты дешифрирования аэрокосмических снимков, полученных с интервалом в 50 лет. Установлены важные пространственные и временные закономерности термоденудации ледового комплекса, развивающейся при термоабразии на побережье Ляховских островов. По соотношению скоростей термоабразии и термоденудации выделено три типа берегов. Определены скорости термоденудации, ширина и площадь термотеррас. Для о. Большой Ляховский проведено сравнение этих показателей для берегов южной и северо-восточной экспозиций, на которых проявляются различные природные факторы, влияющие на деструктивные процессы побережья. Получены показатели динамики берегов с разным криолитологическим строением.

Дистанционные данные, динамика берегов, ледовый комплекс, аласный комплекс, термоденудация, термотерраса, термоабразия

**TERMODENUDATION IN THE COASTAL ZONE OF THE LYAKHOVSKY ISLANDS
(INTERPRETATION OF AEROSPACE IMAGES)**

E.I. Pizhankova

*Lomonosov Moscow State University, Department of Geology,
119992, Moscow, Leninskie Gory, Russia, eipjankova@rambler.ru*

The interpretation of aerospace images obtained within 50 years allowed us to establish the important space and time regularities of the Ice Complex thermal denudation caused by thermal abrasion on the coast of the Lyakhovsky Islands. Three types of coasts have been identified according to the ratio of velocities of thermal abrasion and thermal denudation. The rates of thermal denudation, the size of thermo-terraces have been estimated. For the Bol. Lyakhovsky Island the comparison of these parameters for the shores of southern and north-eastern exposures are presented. A variety of natural factors affecting the destructive processes on the coast has been determined. The parameters of coastal dynamics on the shores with different cryolithological structures have been obtained.

Remote sensing data, coastal dynamics, Ice Complex, Alas Complex, thermal denudation, thermo-terrace, thermal abrasion

ВВЕДЕНИЕ

Термоденудация ледового комплекса (ЛК) – процесс, широко распространенный на берегах морей, рек и озер, а также в бортах карьеров. В разное время изучением термоденудации занимались Ф.Э. Арэ [1980, 1985], Л.А. Жигарев [1975], В.Н. Зайцев [1976], В.В. Максимов [1984, 1992], М.О. Лейбман, А.И. Кизяков [Кизяков и др., 2006; Лейбман, Кизяков, 2007] и др.

При всей очевидной важности полевых режимных наблюдений они не могут охватить достаточно длительный интервал времени и локализованы на ограниченной территории. Поэтому незаменимую роль в изучении многолетней динамики криогенных процессов приобретают дистанцион-

ные материалы (аэро- и космоснимки), полученные с большим временным интервалом. Применение современных программных продуктов обработки изображений и ГИС-технологий позволяет с высокой точностью и на значительных расстояниях получать количественные характеристики береговых процессов [Пижанкова, Добрынина, 2010].

Такие работы, проведенные для островов Бол. Ляховский и Мал. Ляховский, позволили получить новые представления о характере проявления термоденудации на берегах этих островов, ее пространственных и временных закономерностях, а также факторах ее развития.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Методика изучения отступления берегов (термоабразии и термоденудации) с помощью разновременных аэрокосмических снимков достаточно подробно описана в предыдущей статье [Пижанкова, Добрынина, 2010]. Она основана на топографически точном совмещении разновременных и разномасштабных дистанционных данных с помощью программного пакета ScanEx Image Processor v3.0 и проведении измерений с использованием этой же программы либо с привлечением любой другой ГИС-среды (в нашем случае MapInfo Professional 7,5).

Измерение скорости термоденудации производилось по положению бровки термоцирков в точках, наиболее удаленных от берега. Расстояние между такими точками для 1951 и 2001 гг. (время аэрофотосъемки и космосъемки Landsat 7) составляет величину, на которую отступил берег за счет термоденудации. Разделив это значение на 50, получаем скорость отступления бровки термоцирка, которая отражает среднемноголетнюю скорость термоденудации. Ф.Э. Арэ [1980, 1985] показал, что при угле склона менее 90° скорость термоденудации меньше скорости отступления бровки термоцирка. Результаты дешифрирования стереоизображений береговой зоны Ляховских о-вов показывают, что в подавляющем большинстве случаев термоцирки в наиболее удаленной от берега части имеют почти отвесные ледяные обрывы. На “крыльях” термоцирка эти обрывы выполаживаются до 50° и менее. Здесь скорость термоденудации закономерно ниже и может быть вычислена по формуле [Арэ, 1985]:

$$v = v_{бр} \sin \varphi,$$

где v – скорость термоденудации в любой точке склона; $v_{бр}$ – скорость отступления бровки склона; φ – крутизна склона.

Для выявления пространственных закономерностей термоденудации за ее скорость принята скорость отступления бровки термоцирков в их вершинной (наиболее удаленной от берега) части, где она максимальна, а обрыв близок к отвесному. Измерены ширина термотеррас, длина берегов с термоцирками, вычислены площади термотеррас.

Для увязки полученных значений с климатическими условиями проанализирован ход изменения среднемесячных значений температуры воздуха и осадков по метеостанции (м/с) Мыс Шалаурова, расположенной на крайнем юго-востоке о. Бол. Ляховский. При этом использовались данные за весь период существования станции – с 1929 по 1998 г. [<http://aisori.meteo.ru/ClimateR>]. Величины зимних осадков как сумма среднемесячных значений приведены для зимнего периода

в целом с переходом через календарную дату 1 января следующего года (например, сентябрь 1986–апрель 1987 г.). Расчетные значения составляющих радиационного баланса приводятся для двух пунктов – м. Шалаурова и м. Кигилях на крайнем юго-западе о. Бол. Ляховский – так, как это сделано М.К. Гавриловой [1963].

Важная информация о высоте берегов и обрывов получена с топографических карт м-ба 1:200 000.

ПРИРОДНЫЕ УСЛОВИЯ РАЗВИТИЯ ТЕРМОДЕНУДАЦИИ

Природная обстановка, в которой развиваются береговые процессы на Ляховских о-вах, достаточно детально охарактеризована ранее [Пижанкова, Добрынина, 2010]. Основными факторами развития термоденудации являются метеорологические условия, криолитологическое строение берегов и их высота над уровнем моря, а также скорость термоабразии.

Для берегов, подверженных термоденудации, наибольшее влияние имеют такие метеорологические элементы, как температура воздуха за теплый период, солнечная радиация, характер снежного накопления, зависящий от ветрового режима.

За период с 1929 по 1998 г., по данным м/с Мыс Шалаурова, среднегодовая температура воздуха составила $-14,7^\circ\text{C}$. Среднелетняя температура воздуха $+1,6^\circ\text{C}$ (июнь–август), однако и в сентябре температура часто еще остается положительной, достигая $+2,9^\circ\text{C}$ (среднемесячное значение в 1995 г.). Ее изменение за период существования станции представлено на рис. 1.

Максимальная среднемесячная летняя температура ($+6,4^\circ\text{C}$) наблюдалась в августе 1990 г., минимальная ($-3,1^\circ\text{C}$) – в июне 1996 г. Годовая сумма положительных температур воздуха, вычисленная по среднемесячным значениям, равна $175^\circ\text{C}\cdot\text{сут}$ (теплоградусо-суток) [<http://aisori.meteo.ru/ClimateR>].

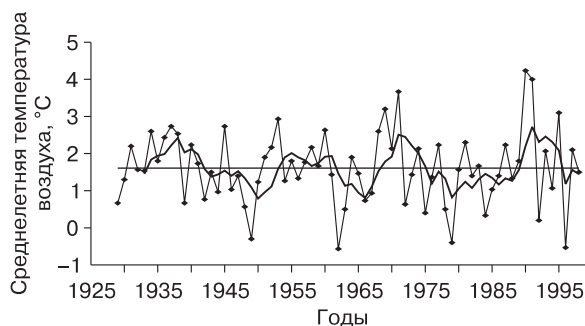


Рис. 1. Изменение среднелетних температур воздуха (данные м/с Мыс Шалаурова) и сглаженная кривая за пятилетний период.

Полярный день на широте островов (74° с.ш.) начинается 2 мая и заканчивается 12 августа, продолжительность солнечного сияния составляет более 1000 ч. Сумерки длятся до 9 ноября (начало полярной ночи) [Гаврилова, 1963]. Продолжительность полярного дня, полярной ночи и суток со сменой дня и ночи (весной и осенью) на широте островов примерно одинакова и составляет около 90 сут. В период полярного дня приток солнечной радиации в Арктике непрерывен в течение суток.

Вследствие низкого стояния солнца в высоких широтах прямая радиация, поступающая на вертикальную поверхность, больше таковой для горизонтальной поверхности в 2,2 раза [Гаврилова, 1963]. Так, для о. Муостах среднее полуденное значение интенсивности прямой солнечной радиации на вертикальную поверхность по наблюдениям за 10 лет составляет в период с февраля по октябрь 10,18 кал/(см²-мин), а на горизонтальную поверхность – 4,58 кал/(см²-мин). Для о. Диксон (период наблюдений 19 лет) соответствующие значения равны 9,18 и 4,24 кал/(см²-мин), что сопоставимо (а иногда превышает) со значениями радиации для умеренных широт (с мая по август) [Гаврилова, 1963].

Действительная продолжительность солнечного сияния определяется особенностями распределения облачности. Восточно-Сибирский район является самым малооблачным среди остальных районов Арктики. Средняя облачность по побережью составляет 6,5–7,0 балла [Гаврилова, 1963]. Однако летом циклоничность увеличивается, достигая максимума в осенний период. При большой повторяемости пасмурного неба в летние месяцы действительная радиация составляет лишь 20–30 % возможной прямой солнечной радиации (на широте 70°). Наибольшая доля действительной продолжительности солнечного сияния от возможной приходится на начало весны. Наименьшие значения отмечаются в октябре–ноябре.

Основными особенностями облаков в Арктике являются малая водность и небольшая мощность, что обуславливает их большую пропускающую и рассеивающую способность и, следовательно, повышенный приток рассеянной радиации к земной поверхности. Рассеянная радиация даже при 10-балльной облачности может достигать больших величин. Максимальные значения интенсивности рассеянной радиации в Арктике могут превышать 1 кал/(см²-мин), средние значения составляют примерно 0,3–0,5 кал/(см²-мин) [Гаврилова, 1963].

Приход суммарной радиации на земную поверхность максимален в мае, составляя для м. Шалаурова 16,0 ккал/см², для м. Кигилях 16,1 ккал/см², и постепенно снижается в июне и июле. Радиационный баланс максимален в июле (7,3 ккал/см², м. Шалаурова) и июне (7,9 ккал/см², м. Кигилях) (табл. 1). Суммарная величина радиационного баланса за лето для м. Шалаурова (май–август) составляет 19,5 ккал/см², для м. Кигилях (май–сентябрь) – 21,1 ккал/см². Переход через нулевые значения отмечается в июле и сентябре.

В.Н. Зайцевым [1976] проводились расчеты составляющих радиационно-теплового баланса, величины оттаивания и теплоты, идущей на таяние льда, для условий низовий р. Яны. Он показал, что турбулентный теплообмен и теплота конденсации играют весьма важную роль в оттаивании пород ледового комплекса и составляют в сумме значения, сопоставимые и даже превышающие величину радиационного баланса. По его данным, полученным при исследовании стаивания льда на обнажении Мус-Хая, суммарная радиация достигает максимальных значений в мае, радиационный баланс – в июне, турбулентный теплообмен и теплота конденсации – в июле. Величина стаивания и тепло, идущее на оттаивание, также максималны в июле и составляют 2,7 м и 19,4 ккал/см² при суммарных величинах за май–сентябрь 7,2 м и 51,7 ккал/см² [Зайцев, 1976].

Таблица 1. Средние месячные расчетные величины составляющих радиационного баланса (ккал/см²) [Гаврилова, 1963]

Составляющие баланса	Месяц												Год
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
<i>Мыс Шалаурова</i>													
Суммарная радиация	0,0	0,4	3,6	10,1	16,0	14,7	12,0	8,1	3,1	0,8	0,0	0,0	68,8
Поглощенная радиация	0,0	0,1	0,5	2,0	3,2	7,9	9,0	6,6	1,3	0,2	0,0	0,0	30,8
Эффективное излучение	2,2	1,9	2,3	2,4	1,9	1,7	1,7	1,9	1,7	2,1	2,0	2,1	23,9
Радиационный баланс	-2,2	-1,8	-1,8	-0,4	1,3	6,2	7,3	4,7	-0,4	-1,9	-2,0	-2,1	6,9
<i>Мыс Кигилях</i>													
Суммарная радиация	0,0	0,5	4,1	10,6	16,1	15,0	12,5	8,2	3,4	1,0	0,1	0,0	71,5
Поглощенная радиация	0,0	0,1	0,6	2,1	3,2	10,0	9,4	6,7	2,4	0,4	0,0	0,0	34,9
Эффективное излучение	1,8	1,8	2,4	2,5	2,4	2,1	2,1	2,0	2,0	1,8	1,9	1,8	24,6
Радиационный баланс	-1,8	-1,7	-1,8	-0,4	0,8	7,9	7,3	4,7	0,4	-1,4	-1,9	-1,8	10,3

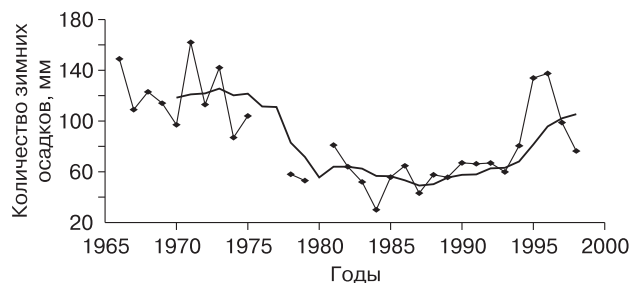


Рис. 2. Изменение количества зимних осадков (данные м/с Мыс Шалаурова) и сглаженная кривая за пятилетний период.

Среднегодовое количество осадков (по данным м/с Мыс Шалаурова) составляет 158 мм, зимних (сентябрь–апрель) – 83 мм [<http://aisori.meteo.ru/ClimatER>]. Их изменение во времени показано на рис. 2.

В годовом ходе максимум зимних осадков выпадает в сентябре–ноябре, когда преобладают ветры западных румбов. Сход снега происходит в начале июня. Общее количество зимних осадков очень невелико, однако их ветровое перераспределение способствует накоплению снега повышенной мощности на восточных подветренных склонах вплоть до образования снежников, что существенно сокращает сроки проявления деструктивных процессов на северо-восточном побережье. Следует особо отметить, что в период с 1977–1978 по 1994–1995 гг. наблюдалось значительное (двукратное) сокращение количества зимних осадков (среднегодовое значение 60,8 мм) по сравнению с 1966–1967 по 1974–1975 гг. (119,7 мм), что должно было отразиться на обстановке снегонакопления северо-восточного побережья, а значит, на характеристиках береговых процессов.

По наблюдениям М.М. Ермолаева [1932], Р.К. Сиско и Г.Л. Рутилевского [1961], начало оттаивания ледяных обнажений на Новосибирских о-вах начинается в мае–начале июня, когда температуры воздуха еще отрицательные. Наиболее интенсивно процесс оттаивания протекает в июле и продолжается, постепенно уменьшаясь, до конца августа – середины сентября [Сиско, 1971]. Термоабразия длится с июля по октябрь и смещена во времени относительно периода термоденудации. Именно в сентябре–октябре в районе островов наиболее часты штормовые ветры и нагоны, которые играют определяющую роль в термоабразии берегов [Григорьев и др., 2006].

ПРОЯВЛЕНИЕ ТЕРМОДЕНУДАЦИИ НА БЕРЕГАХ РАЗЛИЧНОЙ ЭКСПОЗИЦИИ

Одним из трех типов разрушения берегов о. Бол. Ляховский [Пижанкова, Добрынина, 2010]

является описанный в 1963 г. Н.Н. Романовским [1963] процесс отступления берегов, сложенных ледовым комплексом, под действием положительных температур воздуха и солнечной радиации. Этот процесс получил название термоденудации. В прибрежной части термоденудационных уступов обнажаются породы ЛК с повторно-жильными льдами. Местные промысловики и охотники эти обрывы называли “мускыгамы” [Ермолаев, 1932], или “ледяные обрывы”. Хотя термин “кыгам” не получил широкого распространения в научной литературе, представляется, что при описании термоденудации удобно пользоваться именно им. Высота берегов, на которых способен развиваться этот процесс, как правило, превышает 20 м. Изредка концы обрывов захватывают и более низкие берега, характерные для окраин аласов, что было прослежено на аэро- и космоснимках. В летний период кыгамы постоянно отступают за счет оттаивания льда. У подножия обрыва скапливается разжиженный грунт. С течением времени здесь образуется термотерраса, имеющая вид выровненной поверхности с байджерахами, которая заселяется растительностью. Со стороны моря термотерраса разрушается термоабразией, что и стимулирует отступление берега за счет термоденудации.

Ф.Э. Арэ [1980] показал, что термотеррасы образуются в том случае, когда кыгам отступает с большей скоростью, чем берег размывается морем. На о. Бол. Ляховский термоденудационные формы на берегах, сложенных ледовым комплексом, отмечаются практически повсеместно, за исключением западного берега.

Детальный анализ аэрокосмических снимков береговой зоны Ляховских о-вов показал, что на берегах, сложенных с поверхности ЛК, прослеживаются ступени различной длины, замыкающиеся и не замыкающиеся в виде полуцирков у береговой черты. Оказалось, что на берегах разной экспозиции морфология и параметры этого явления различны. В нескольких случаях, преимущественно на северо-восточном побережье, дешифрируются две ступени термотеррас.

В плане для термоденудационных форм характерны циркуобразные очертания с наиболее удаленной от берега вершинной частью и приближающимися к берегу “крыльями”. Они, как правило, приурочены к водотокам.

Для восточного побережья о. Бол. Ляховский типичны термоцирки классической “циркуобразной” формы (рис. 3, А). Вид термоцирков в плане зависит от характера рельефа разрушаемой термоденудацией поверхности едомы. Там, где ярко выражены увалы между водотоками, относительно недалеко отстоящими друг от друга (200–350 м), термоцирки имеют достаточно крутые “крылья”,

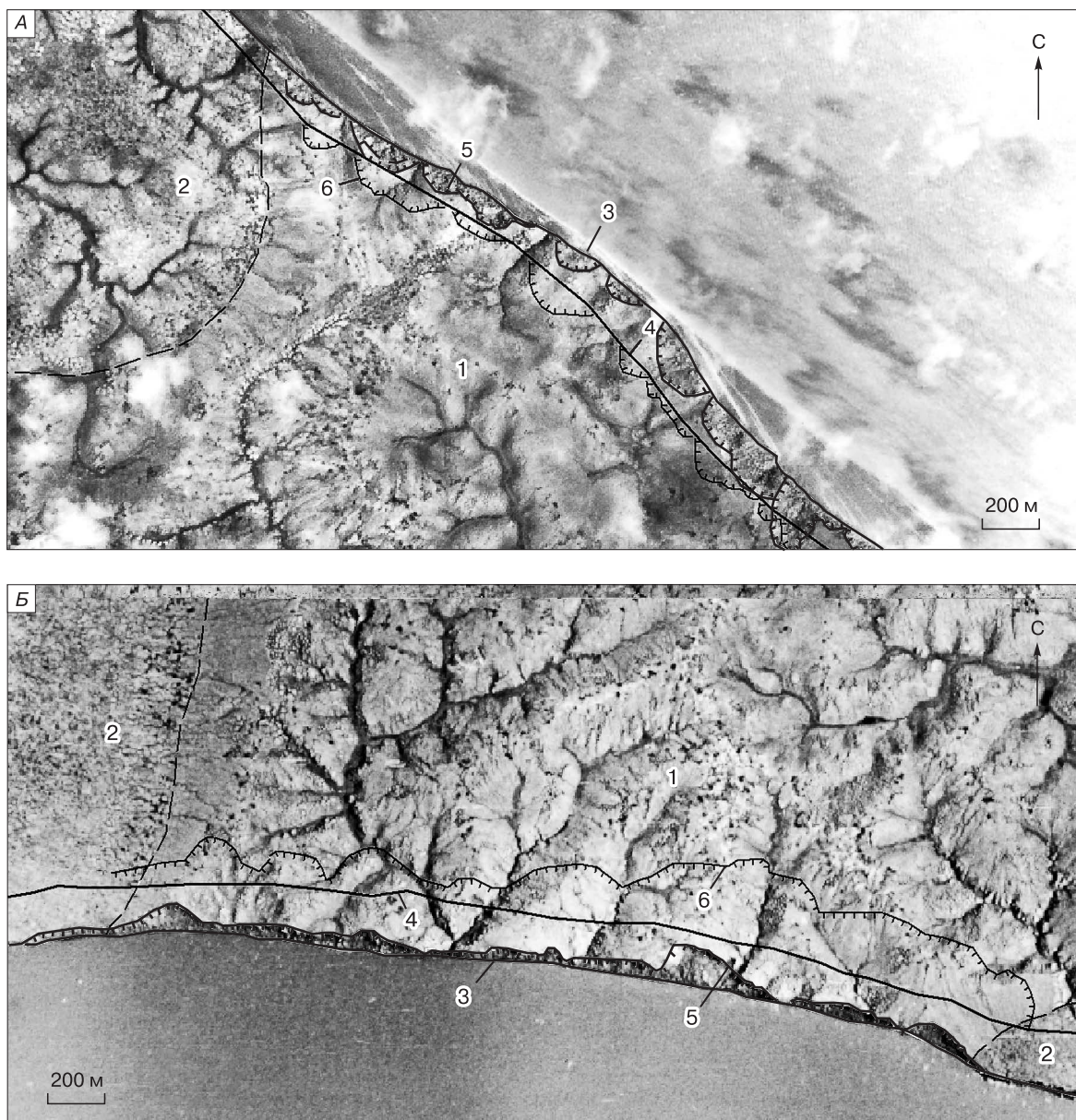


Рис. 3. Аэрофотоснимки участков северо-восточного (А) и южного (Б) побережий о. Бол. Ляховский с отдекрированными термоденудационными формами рельефа за разные даты:

1 – едома, 2 – алас, 3 – положение береговой линии в 1951 г., 4 – положение береговой линии в 2001 г., 5 – положение бровки термоцирков в 1951 г., 6 – положение бровки термоцирков в 2001 г.

подходящие к берегу под углом около 45° . Радиус дуги термоцирка несколько меньше половины расстояния между водотоками.

При своем развитии вершина термоцирка отодвигается в глубь побережья, достигая максимального расстояния от берега на вершинной поверхности увала (ей соответствует максимальная ширина термотеррасы, которая и измерялась в ходе исследований). Проследив линию водоразде-

ла, можно понять, как будет отступать вершина термоцирка в дальнейшем.

Характерным для южного берега является слияние “крыльев” термоцирков, когда прибрежная полоса приобретает фестончатый облик, а термотеррасы сливаются в протяженные (до 0,7–2,0 км) ступени (см. рис. 3, Б). Высота берегов, на которых развита термоденудация, составляет от 20 м (реже менее) до 40 м, высота обрывов достигает 15–30 м.

Термотеррасы развиты как на участках берега, целиком сложенных ЛК, так и на участках, подстилаемых менее льдистыми породами (см. ниже).

Общая длина берегов о. Бол. Ляховский, для которых характерны термоденудационные формы, составляет 24,9 км, или почти 70 % берегов едомы.

Существенно меньшие масштабы имеет образование термоцирков на побережье **о. Мал. Ляховский**. Активно развивающийся процесс термоденудации характерен лишь для небольшой части восточного побережья острова (в общей сложности составляющей 3 км, или менее 20 % берегов едомы). Морфология термоденудационных форм близка к таковой для северо-восточного берега о. Бол. Ляховский. Высота берегов, на которых развита термоденудация, не превышает 25 м, преимущественно 15–20 м. Высота обрывов составляет 3–4 м. На всей остальной территории острова процесс активной термоденудации завершен вследствие прекращения термоабразии. Берега имеют выположенный профиль и покрыты растительностью [Пижанкова, Добрынина, 2010].

ИЗМЕРЕННЫЕ ПО ДИСТАНЦИОННЫМ ДАННЫМ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕРМОДЕНУДАЦИОННЫХ БЕРЕГОВ

Измерения, проведенные для термоденудационных форм рельефа, и сравнение их для различных участков побережий (табл. 2) показали следующее.

- Термоденудационные формы в настоящее время развиты почти на 70 % отступающего побережья

едомы на о. Бол. Ляховский и на 20 % – на о. Мал. Ляховский.

- Наблюдаются значительные различия как в морфологии, так и в количественных параметрах этих форм для берегов разной экспозиции.

- Средняя скорость термоденудации для южного побережья о. Бол. Ляховский составляет 4,9 м/год при длине отступающего берега 19,7 км.

- Средняя скорость термоденудации для северо-восточного берега составляет 2,5 м/год при длине отступающего берега 5,2 км. Таким образом, скорость термоденудации для южного берега больше таковой для северо-восточного в два раза.

- На южном побережье скорость термоденудации превышает скорость термоабразии в 1,3 раза, на восточном они примерно равны. Анализ скоростей для юго-восточного и восточного побережий о. Мал. Ляховский выявил такую же тенденцию.

- На западном побережье термоденудационных форм не обнаружено.

Как следует из табл. 2, в численных значениях величин, характеризующих термоденудацию, наблюдается закономерная связь с особенностями термоабразии, проанализированными ранее [Пижанкова, Добрынина, 2010].

Существенно более низкие скорости термоденудации, характерные для северо-восточного побережья о. Бол. Ляховский, обусловлены как более низкими скоростями термоабразии, так и “консервирующим” действием снежников, формирующихся на берегах восточной экспозиции.

Наблюдается также изменение количества и размеров термотеррас в 2001 г. по сравнению с

Таблица 2. Характеристика термоденудации на Ляховских островах

Измеренные по дистанционным данным параметры динамики берегов	Год	О. Бол. Ляховский		О. Мал. Ляховский	
		Южный берег	Северо-восточный берег	Юго-восточный берег	Восточный берег
Длина берегов, сложенных с поверхности ЛК, км	2001	23,7	12,3	7,8	8,3
Длина побережья с термоцирками, км	1951	16,6 (70)	5,8 (47)	1,6 (20,5)	2,7 (32,5)
(Процент от длины берегов, сложенных ЛК)	2001	19,7 (83)	5,2 (42)	1,6 (20,5)	1,4 (17)
Количество термоцирков	1951	51	31	8	8
	2001	57	24	8	8
Скорость отступления бровки термоцирков в наиболее удаленной от берега части, м/год	Интервал	2,3–7,1	1,1–3,7	1,8–2,7	0,6–2,5
	Среднее	4,9	2,5	2,3	1,1
Скорость термоабразии (в месте измерения отступления бровки термоцирков), м/год	Интервал	2,7–6,2	1,9–3,3	2,0–2,3	0,4–2,4
	Среднее	3,7	2,5	2,1	1,2
Среднемноголетняя скорость термоабразии*, м/год	–	3,6	2,6	2,3	0,5
Ширина термотеррас (средняя из наибольших), м	1951	56	85	54	53
	2001	94	67	75	31
Суммарная площадь термотеррас для берегов различной экспозиции, км ²	1951	0,71	0,39	0,07	0,09
	2001	1,74	0,33	0,08	0,04
Приращение/уменьшение площади термотеррас, км ²	–	+1,03	–0,06	+0,01	–0,05
	1951		1,1		0,16
Общая площадь термотеррас, км ²	2001		2,07		0,12

* Из работы [Пижанкова, Добрынина, 2010].

1951 г. На о. Бол. Ляховский общая площадь термотеррас возросла к 2001 г. с 1,1 до 2,1 км², при этом на южном побережье площадь термотеррас увеличилась в 2,5 раза, ширина – в 1,7 раза. На северо-восточном берегу площадь термотеррас уменьшилась в 1,2 раза, ширина – в 1,3 раза. На о. Мал. Ляховский площадь термотеррас сократилась с 0,16 до 0,12 км² (см. табл. 2).

По соотношению скоростей термоабразии ($v_{та}$) и термоденудации ($v_{тд}$) на о. Бол. Ляховский можно выделить три типа берегов, сложенных ЛК:

- западный берег ($v_{та} \sim v_{тд} \geq 5$ м/год) – термотеррасы не образуются;
- южный берег ($v_{та} < v_{тд}$) – термотеррасы имеют существенно увеличенные в 2001 г. по сравнению с 1951 г. ширину и площадь;
- северо-восточный берег ($v_{та} \geq v_{тд}$) – термотеррасы имеют равные или несколько меньшие ширину и площадь в 2001 г. по сравнению с 1951 г. при значениях скоростей термоабразии (около 2,5 м/год), несколько превышающих скорости термоденудации.

ТЕРМОДЕНУДАЦИЯ НА БЕРЕГАХ С РАЗЛИЧНЫМ ТИПОМ БЕРЕГОВОГО РАЗРЕЗА

Особенностью южного побережья о. Бол. Ляховский является сложное криолитологическое строение его берегового разреза [Тумской, Басилян, 2009]. Однако на скорости термоабразии и термоденудации наибольшее влияние оказывает тот факт, сложен ли берег целиком высокольдистыми отложениями едомного ЛК либо он подстилается

менее льдистыми и более древними четвертичными породами, обнажающимися выше уреза воды. В первом случае говорится об однослойном береговом разрезе, во втором – о двухслойном [Пижанкова, Добрынина, 2010].

Результаты измерений термоденудационных форм на южном побережье о. Бол. Ляховский представлены в табл. 3.

Изучение характера проявления термоденудации на берегах с различным типом берегового разреза показало следующее.

1. Термотеррасы образуются при высоте берега более 15–20 м как там, где ЛК подстилается менее льдистыми породами (двухслойный разрез), так и на однородных в криолитологическом плане берегах.

2. Скорость термоденудации берегов с однородным разрезом в 1,4 раза больше скорости термоденудации берегов с двухслойным разрезом, при этом скорость термоабразии для берегов с однослойным разрезом превышает таковую для берегов с двухслойным разрезом в 1,2 раза.

3. На участках побережья с однородным строением берегового обрыва скорость термоденудации в 1,6 раза выше скорости термоабразии. На участках с неоднородным строением берега скорость термоденудации больше скорости термоабразии в 1,1 раза.

4. Средняя ширина термотеррас в 2001 г. для берегов с однослойным разрезом в 2 раза превысила таковую для берегов с двухслойным разрезом и составила 161 м. В 1951 г. это превышение составляло 1,6 раза, а ширина термотеррас равнялась 80 м.

Таблица 3. Характеристика термоденудации на южном побережье о. Бол. Ляховский

Измеренные по дистанционным данным параметры динамики берегов	Год	Берег Захар-Сис (однослойный разрез)	Берег восточнее р. Зимовье (двухслойный разрез)
Длина берегов, сложенных с поверхности ЛК, км	2001	5,9	16,9
Длина побережья с термоцирками, км	1951	5,1 (86)	11,4 (68)
(Процент от длины берегов, сложенных ЛК)	2001	5,3 (90)	14,3 (85)
Количество термоцирков	1951	10	41
	2001	10	47
Скорость отступления бровки термоцирков в наиболее удаленной от берега части, м/год	Интервал	5,1–7,1	2,3–6,0
	Среднее	5,9	4,3
Скорость термоабразии (в месте измерения отступления бровки термоцирков), м/год	Интервал	3,2–3,9	2,7–6,2
	Среднее	3,6	3,8
Среднемноголетняя скорость термоабразии*, м/год	–	4,1	3,4
Ширина термотеррас (средняя из наибольших), м	1951	80	49
	2001	161	80
Суммарная площадь термотеррас, км ²	1951	0,24	0,47
	2001	0,64	1,10
Приращение площади термотеррас, км ²	–	0,40	0,63

* Из работы [Пижанкова, Добрынина, 2010].

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Термоденудация на берегах арктических морей – процесс малоисследованный. Сложность его изучения обусловлена помимо труднодоступности арктических побережий сложностью организации наблюдений и слабой методической базой подобных работ.

Весьма важным, а подчас и единственно возможным инструментом исследования термоденудации и соответствующих форм рельефа являются дистанционные данные за разные даты. При этом, чем больше интервал между съемками, тем более надежен и точен результат измерений и более достоверно значение среднесезонной скорости процесса. В свою очередь, полученные таким способом данные позволяют выйти на важные закономерности в развитии термоденудации на значительных по протяженности побережьях, что в противном случае сделать весьма сложно.

На берега, подверженные термоденудации, наибольшее влияние оказывают такие метеорологические элементы, как летняя температура воздуха (сумма положительных температур), солнечная радиация, в высоких широтах определяющаяся продолжительностью полярных дня и ночи и высотой солнца над горизонтом, и характер снегонакопления, зависящий от ветрового режима. Многолетний ход этих элементов испытывает вариации, на что чутко реагирует процесс оттаивания береговых обнажений. Кроме того, изменение скорости термоабразии приводит к изменению ширины термотеррас, тем самым стимулируя либо замедляя процесс термоденудации.

Ф.Э. Арэ и Е.Н. Молочушкиным [Арэ, 1980] изучались составляющие радиационно-теплого баланса для отступающих обнажений о. Муостах в море Лаптевых. Измерения проводились с середины августа до середины сентября в 1962 г. и эпизодически в 1963 г. Как показывает рис. 1, эти годы характеризовались весьма низкими (ниже среднесезонных значений) летними температурами воздуха. Период измерений в 1962 г. охватывает время, когда все составляющие радиационно-теплого баланса были минимальными за летний период. Измерения, как указывает автор, велись при сплошной облачности. Наблюдения в 1963 г. охватывали весь летний период, хотя и проводились эпизодически, но сведения о количестве солнечных и пасмурных дней автором не приведены. Указано лишь, что за июнь–август 1963 г. рассеянная радиация составила 81 % суммарной.

На основе полученных данных Ф.Э. Арэ [1980] делает следующие выводы: 1) скорость стаивания полностью определяется комбинированным воздействием температуры воздуха и солнечной радиации [с. 62]; 2) скорость термоденудации на берегах арктических морей практически не зависит от экспозиции и крутизны уступов [с. 65];

3) при сплошной облачности в летнее время приход суммарной солнечной радиации на склоны мало отличается от прихода на горизонтальную поверхность [с. 50].

Если с первым выводом можно и нужно согласиться, то второй и третий вызывают возражения. Анализ дистанционных данных показал, что процесс термоденудации на о. Бол. Ляховский наибольшее развитие получил на берегах южной экспозиции. Здесь термоцирки занимают 83 % длины размываемого ЛК. На летних снимках Landsat 7 ETM+ четко фиксируется полоса с более высокой температурой воды вдоль участков берега, подверженных термоденудации. Она сформирована стекающими с обнажения ЛК тальми водами. На расположенных рядом участках аласов, срезаемых берегом, в июле (время съемки Landsat 7) еще фиксируется снег на прибрежной береговой отмели.

На берегах западной экспозиции термоцирков по ЛК не обнаружено, однако для них свойственно аналогичное состояние прибрежной полосы моря. Там, где береговой линией срезаются аласы, присутствует узкая (10–20 м) полоса снега. Там, где море подмывает едому, берег свободен от снега, а в прибрежной полосе фиксируется полынья. Это говорит об активно протекающем процессе оттаивания пород ЛК, однако при высокой скорости термоабразии термотеррасы образовываться не успевают.

Для северо-восточного побережья эти явления не характерны. Здесь береговая полоса на всем своем протяжении оконтурена снежниками шириной до 40 м. В термоцирках вдоль подножия кыгмов часто прослеживается узкая (до 5–10 м) полоса снега.

Все это свидетельствует о проявленных экспозиционных различиях в скоростях термоденудации, которые обусловлены, во-первых, радиационными факторами, во-вторых, накоплением снега повышенной мощности на подветренных склонах восточной экспозиции.

Исследования, проведенные В.В. Максимовым [1984] на обнажении Мус-Хая и бортах карьеров в районе пос. Кулар, показали, что существуют различия в скорости оттаивания ЛК в зависимости от экспозиции: на термоуступах южной и юго-западной экспозиций наблюдалась наибольшая интенсивность стаивания, на термоуступах восточной и, особенно, северной экспозиций стаивание шло менее интенсивно.

Из детального анализа аэрокосмических снимков следует, что термоденудационные формы характерны только для берегов высотой более 15–20 м, и чем выше берег, тем скорость отступания бровки термоцирка больше, т. е. существует зависимость скорости термоденудации береговых обнажений от их высоты, а значит, от площади от-

ступающего склона. При критических значениях в 15–20 м меняется механизм разрушения берегов: блоковый тип сменяется термоденудационным на высоких крутых склонах, когда на первое место выступает радиационно-тепловой фактор.

Эта же зависимость скорости термоденудации от высоты обрыва, сложенного ледовым комплексом, проявилась и в больших значениях скоростей термоденудации, характерных для однослойного берегового разреза по сравнению с двухслойным. В последнем случае при одинаковой общей высоте берега высота обрыва, сложенного ЛК, меньше, чем в случае однослойного разреза, что, по-видимому, и отразилось в меньших скоростях термоденудации.

Сравнение соотношений скоростей термоабразии и термоденудации позволяет выйти на важные временные закономерности развития обоих процессов. Например, высокая скорость термоденудации при более низких скоростях термоабразии и увеличенном размере термотеррас говорит о предшествующем сокращении скорости термоабразии, которая может быть вызвана изменением гидрометеорологических факторов, в частности сокращением безледного периода. Уменьшение размеров термотеррас и увеличение скорости термоабразии по сравнению со скоростью термоденудации на восточных берегах может свидетельствовать о сокращении зимних осадков либо изменении ветрового режима, участвующего в их перераспределении.

По-видимому, решающую роль в уменьшении скорости термоабразии на южном берегу о. Бол. Ляховский сыграло усиление ледовитости, наблюдавшееся в Арктике в 60–70-х гг. XX в. [Захаров, 1981; Захаров, Малинин, 2000]. Увеличение площади ледяного покрова привело к сокращению безледного периода в этот временной интервал, а значит, произошло изменение таких важных гидрологических факторов, как длительность воздействия волнения на берега, энергия и длина пробега волн, количество и сила штормов и нагонов. Анализ ледовой обстановки для Карского моря [Васильев, 2005] показал, что в 70-е гг. по сравнению 50-ми гг. XX в. наблюдалось сокращение продолжительности безледного времени примерно на 20 сут. С.О. Разумов [2000] приводит данные, также говорящие о сокращении безледного времени близ мыса Крестовского (Восточно-Сибирское море) в 1960–1970-е гг.

Сумма положительных температур воздуха, которая определяет скорость термоденудации [Арэ, 1980], в этот период изменялась незначительно (от 100 до 300 °С·сут, по данным м/с Мыс Шалаурова). Для южного побережья о. Бол. Ляховский, по-видимому, именно сокращение безледного времени привело к уменьшению скорости термоабразии, а вслед за этим – к росту ширины и площади термотеррас, что и наблюдается при сравнении разновременных дистанционных данных.

На северо-восточном побережье о. Бол. Ляховский, как показывают исследования, в большей степени проявилось влияние значительного (двукратного) сокращения количества зимних осадков в период 1977–1994 гг. (среднемноголетнее значение 60,8 мм) по сравнению с 1966–1974 гг. (119,7 мм) (см. рис. 2), что выразилось в уменьшении консервирующего влияния снежников на берега. С этим может быть связано увеличение скорости термоабразии на северо-восточном берегу о. Бол. Ляховский, повлекшее за собой сокращение ширины и площади термотеррас.

Сравнение полученных в ходе настоящих исследований данных с оценками по формулам, предлагаемым Ф.Э. Арэ [1980, 1985], показало, что при годовой сумме положительных температур воздуха, равной 175 °С·сут, характерной для м/с Мыс Шалаурова, скорость термоденудации отвесных уступов, сложенных ЛК, получается равной 2,8 м/год. В действительности измеренная по разновременным дистанционным данным скорость отступления бровки термоцирков в их вершинной части составляет для южного берега от 2,3 до 7,1 м/год, средняя 4,9 м/год, а для северо-восточного берега – от 1,1 до 3,7 м/год, средняя 2,5 м/год. Среднемноголетняя скорость термоденудации ЛК западного берега, как уже указывалось, примерно равна скорости термоабразии и составляет около 5 м/год. Эти данные говорят о том, что оценки, приводимые по имеющимся аналитическим зависимостям, носят весьма приближенный характер. Поэтому привлечение дистанционных данных должно служить для верификации любых расчетных методов.

ВЫВОДЫ

1. На размываемых берегах Ляховских островов, сложенных ледовым комплексом, повсеместно, за исключением западного берега, развиты формы термоденудационного рельефа, представляющие собой термоцирки с кыгамами в привершинных частях и термотеррасами у основания. На южном берегу о. Бол. Ляховский они часто сливаются друг с другом, образуя фестончатые формы.
2. Термоденудационные формы рельефа в настоящее время развиты примерно на 70 % отступающего побережья едомы на о. Бол. Ляховский и на 20 % – на о. Мал. Ляховский.
3. Характер проявления и параметры термоденудации существенно различаются для берегов разной экспозиции. По соотношению скоростей термоабразии и термоденудации на о. Бол. Ляховский выделено три типа берегов: а) при $v_{та} \sim v_{тд} \geq 5$ м/год термотеррасы не образуются, что характерно для западного берега; б) при $v_{та} < v_{тд}$ термотеррасы имеют существенно увеличенные в 2001 г. по сравнению с 1951 г. ширину и площадь (характерно для южного берега); в) при $v_{та} \geq v_{тд} \sim 2,5$ м/год термотеррасы имеют равные или не-

сколькo меньше ширину и площадь в 2001 г. по сравнению с 1951 г. (характерно для северо-восточного берега).

4. Термоабразия и термоденудация более быстрыми темпами идут на берегах, целиком сложенных ледовым комплексом, в то время как берега, где ЛК подстилается менее льдистыми четвертичными породами, отстают медленнее. Скорость термоденудации для первых из них превышает скорость для вторых в 1,4 раза и составляет 5,9 м/год. Это связано не только с соответствующей разницей в скоростях термоабразии, но и, по-видимому, с более существенным влиянием факторов радиационно-теплового баланса на значительных по площади склонах (обрывах), целиком сложенных ЛК.

5. Предполагается, что увеличение ширины и площади термотеррас на южном побережье о. Бол. Ляховский связано с уменьшением скорости термоабразии в 70-х гг. XX в., что обусловлено сокращением безледного времени в этот период. На северо-восточном побережье уменьшение ширины и площади термотеррас связано, вероятно, с двукратным уменьшением количества зимних осадков в 1980-е гг. по сравнению с 1960-ми гг. В 1970-е гг. здесь эти два фактора усиливали друг друга (были велики ледовитость и количество зимних осадков).

6. Для более представительной характеристики динамики арктических берегов необходимо привлечение более широкого спектра гидрометеорологических показателей и достаточно длительные временные ряды наблюдений для объяснения многолетних вариаций изучаемых процессов, а также возможно более полный временной и масштабный ряд дистанционных данных. Это подразумевает постановку аэрокосмического мониторинга за динамикой берегов Российской Арктики с привлечением всех имеющихся архивных материалов.

7. Параметры термоденудации и термоабразии тесно связаны с динамикой гидрометеорологической обстановки. Поэтому при осуществлении прогноза динамики берегов необходимо учитывать такие прогнозно-значимые величины, как сумма положительных температур воздуха, радиационный баланс поверхности кыгамов, длительность безледного времени, динамика изменения количества зимних осадков и характер снегонакопления. Необходима информация о строении размываемой толщи пород, высоте берега и площади обнаженной поверхности берегового обрыва, нагонах и течениях, глубине и протяженности подводного берегового склона, наличии аккумулятивных форм и осушек.

Литература

- Арэ Ф.Э. Термоабразия морских берегов. М., Наука, 1980, 160 с.
 Арэ Ф.Э. Основы прогноза термоабразии берегов. Новосибирск, Наука, 1985, 172 с.

Васильев А.А. Влияние факторов природной среды на динамику морских берегов западного сектора Российской Арктики // Криосфера Земли, 2005, т. IX, № 3, с. 64–72.

Гаврилова М.К. Радиационный климат Арктики. Л., Гидрометеоздат, 1963, 103 с.

Григорьев М.Н., Разумов С.О., Куницкий В.В., Спектор В.Б. Динамика берегов восточных арктических морей России: основные факторы, закономерности и тенденции // Криосфера Земли, 2006, т. X, № 4, с. 74–94.

Ермолаев М.М. История открытия Новосибирского архипелага, его исследование и развитие островных промыслов // Полярная геофизическая станция на острове Большом Ляховском: Тр. СОПС, сер. Якутская. Л., 1932, вып. 7, с. 9–38.

Жигарев Л.А. Термоденудационные процессы и деформационное поведение протаивающих грунтов. М., Наука, 1975, 110 с.

Зайцев В.Н. К методике прогноза скорости термоабразии в условиях аккумулятивных равнин Северо-Востока. М., Изд-во Моск. ун-та, 1976, с. 35–40.

Захаров В.Ф. Льды Арктики и современные природные процессы. Л., Гидрометеоздат, 1981, 136 с.

Захаров В.Ф., Калинин В.Н. Морские льды и климат. СПб., Гидрометеоздат, 2000, 91 с.

Кизяков А.И., Лейбман М.О., Передня Д.Д. Деструктивные рельефообразующие процессы побережий арктических равнин с пластовыми подземными льдами // Криосфера Земли, 2006, т. X, № 2, с. 79–89.

Лейбман М.О., Кизяков А.И. Криогенные оползни Ямала и Югорского полуострова. М., ИКЗ СО РАН, 2007, 206 с.

Максимов В.В. Оценки интенсивности термоденудационных процессов на севере Якутии // Изучение и прогноз криогенных физико-геологических процессов: Сб. науч. тр. М., ВСЕГИНГЕО, 1984, с. 65–72.

Максимов В.В. Итоги многолетних наблюдений за термоденудацией бортов карьеров в отложениях ледового комплекса // Методы изучения криогенных физико-геологических процессов: Сб. науч. тр. М., ВСЕГИНГЕО, 1992, с. 60–71.

Пижанкова Е.И., Добрынина М.С. Динамика побережья Ляховских островов (результаты дешифрирования аэрокосмических снимков) // Криосфера Земли, 2010, т. XIV, № 4, с. 66–79.

Разумов С.О. Скорость термоабразии морских берегов как функция климатических и морфологических характеристик побережья // Геоморфология, 2000, № 3, с. 88–94.

Романовский Н.Н. К вопросу о формах разрушения берегов о. Большого Ляховского // Новосибирские острова: Тр. ААНИИ. Л., 1963, т. 224, с. 54–66.

Сиско Р.К. Особенности морфологии и динамики термоабразионных берегов острова Новая Сибирь // Геоморфология и литология береговой зоны морей и других крупных водоемов. М., Наука, 1971, с. 63–67.

Сиско Р.К., Рутилевский Г.Л. Как исчезают острова // Проблемы Арктики и Антарктики. Л., Морской транспорт, 1961, вып. 8, с. 103–106.

Тумской В.Е., Басилян А.Э. Стратиграфия четвертичных отложений берегов пролива Дмитрия Лаптева (Северная Якутия) // Фундаментальные проблемы квартара: итоги изучения и основные направления дальнейших исследований: Материалы VI Всерос. совещ. по изучению четвертич. периода. Новосибирск, Изд-во СО РАН, 2009, с. 592–593.

<http://aisori.meteo.ru/ClimateR>

Поступила в редакцию
23 декабря 2010 г.