

## ДЕСТРУКТИВНЫЕ РЕЛЬЕФОБРАЗУЮЩИЕ ПРОЦЕССЫ ПОБЕРЕЖИЙ АРКТИЧЕСКИХ РАВНИН С ПЛАСТОВЫМИ ПОДЗЕМНЫМИ ЛЬДАМИ

А.И. Кизяков, М.О. Лейбман, Д.Д. Передня

*Институт криосферы Земли СО РАН, 625000, Тюмень, а/я 1230, Россия, kizyakov@mtu-net.ru*

Рассматривается развитие деструктивных рельефообразующих процессов на побережьях Арктических равнин на примере Югорского полуострова. Геоморфологическое картирование и изучение геолого-геоморфологического строения термоцирков и береговых уступов позволили оценить распространение термоденудационных форм рельефа и берегов разных типов. На основе сопоставления результатов повторных наблюдений на мониторинговых площадках и использования данных дистанционного зондирования определена скорость роста термоцирков и выявлена динамика береговой линии. Исходя из этого рассчитан вынос отложений и водно-растворимых солей с суши в береговую зону.

*Термоденудация, термоабразия, пластовый лед, отступление берегов*

### DESTRUCTIVE RELIEF-FORMING PROCESSES AT THE COASTS OF THE ARCTIC PLAINS WITH TABULAR GROUND ICE

A.I. Kizyakov, M.O. Leibman, D.D. Perednya

*Earth Cryosphere Institute SB RAS, 625000, Tyumen, P/O box 1230, Russia, kizyakov@mtu-net.ru*

The paper deals with the development of destructive relief-forming processes at the coasts of the Arctic plains, by the example of Yugorsky peninsula. Geomorphic mapping and study of construction of thermocirques and flat bluffs allows estimation of the distribution of various relief forms and coasts of various types. Collation of the results of repeated measurements at the experimental sites and remote-sensing data is used to acquire the rate of thermocirque extension and shoreline dynamics. These data serves as a base for calculation of sediment and soluble salts removal from land onto the coastal zone.

*Thermal denudation, coastal thermoerosion, tabular ground ice, coastal retreat*

### ВВЕДЕНИЕ

Целью данной работы является изучение морфолитогенеза Арктических равнин для разработки прогноза развития опасных рельефообразующих процессов. В строении поверхностных отложений Арктических равнин значительную роль играют мелкопесчаные и пылеватые частицы, что в совокупности с высокой льдистостью и залегающими близко к поверхности подземными льдами приводит к широкому развитию процессов термоденудации.

На береговых уступах термоденудация включает протаивание многолетнемерзлых пород и связанные с этим гравитационные процессы – обвалования, осыпания и оползания [Арэ, 1980]. На морских побережьях, сложенных многолетнемерзлыми породами, наблюдается парагенез термоденудации и термоабразии. Различные соотношения скоростей этих процессов, которые определяются гидродинамическими условиями береговой зоны и криолитологическим строением береговых уступов, приводят к образованию разных типов берегов, различающихся скоростью отступления и формой берегового уступа.

Механизмы разрушения и динамика развития арктических берегов, в том числе и Карского моря,

на побережье которого проводились наши наблюдения, подробно изучены [Арэ, 1968, 1980; Васильев, 2000, 2002; Воскресенский, Совершаев, 1998; Попов и др., 1988; Природные..., 1997; Совершаев, 1992; Совершаев, Камалов, 1992; Соломатин и др., 1998]. Выявлено влияние льдистости, литологического состава и размываемости горных пород, слагающих берега, на развитие комплекса термоабразии и термоденудации на береговых уступах [Арэ, 1980; Васильев, 2002]. Различиями в криолитологическом строении определяются скорости разрушения берегов при равных гидродинамических условиях [Совершаев, Новиков, 1991].

Для условий морской термоабразии В.А. Совершаев [1992] выделил два основных типа берега: термоабразионный и абразионно-термоденудационный. Цикл развития абразионного берега состоит из выработки волноприбойной ниши, обрушения козырька и его размыва. Берега этого типа преобладают на открытых морских побережьях с интенсивным волновым и термическим воздействием, таких как м. Харасавэй и м. Марре-Сале в Карском море [Воскресенский, Совершаев, 1998]. При ослабленной термоабразии волны не способ-

ны выработать глубокую нишу в береговом откосе, и блокового обрушения залегающей выше толщи не происходит. Оттаявшие отложения смещаются вниз по склону в ходе осыпания, оползания или вязкопластического течения и обнажают мерзлую толщу, начинающую также протаивать. Такие берега относятся к абразионно-термоденудационным и являются более устойчивыми, чем термоабразионные.

Парагенез термоабразии и термоденудации в районах распространения пластовых и повторно-жильных льдов в условиях, сходных с условиями Югорского п-ова, изучен на западном побережье п-ова Ямал. В районе полярной станции Марре-Сале скорость отступления береговой линии за счет термоабразии и термоденудации составляет 0,5–3,2 м/год, в то время как скорость термоденудации берегового клифа – около 0,4 м/год [Васильев, Покровский, 2001].

Совместное развитие термоабразии и термоденудации в районах с мощными повторно-жильными льдами рассматривалось в работах Ф.Э. Арэ [1968, 1980], М.Н. Григорьева [1996]. В восточном секторе Российской Арктики на участках берегов, сложенных едомным комплексом, характерным процессом является формирование одно- и двух-ступенчатых термотеррас, которые формируются по мере отступления бровки берегов под термическим действием воздуха и солнечной радиации [Григорьев, 1996; Морская..., 1980]. Площадка термотеррасы образуется, когда скорость термоденудации обнажений ледового комплекса превышает скорость термоабразии. Разработан метод определения скорости отступления термоабразионных берегов по размерам термотеррас [Арэ и др., 2003, 2004].

Развитие термоденудационных процессов приобретает ряд специфических особенностей в районах распространения пластовых льдов. Отличительной чертой районов с залежами пластовых льдов, выделяющей их среди побережий, сложенных многолетнемерзлыми породами, является наличие участков с резкой активизацией процессов термоденудации, вызванной вскрытием мощных залежей льда. К участкам вскрытия пластовых льдов приурочены береговые термоцирки и термотеррасы, скорость отступления тыловых стенок которых намного превышает скорость термоабразионного отступления береговых уступов соседних участков.

Термоцирки, развивающиеся по вскрываемым залежам пластового льда, встречаются во многих районах Арктических равнин: на севере Западной Сибири, на Таймыре, на побережье Анадырской низменности, в Канаде и на Аляске, на побережье Югорского п-ова и на о. Колгуев [Воскресенский, 2001; Воскресенский, Совершаев, 1998; Дубиков, 2002; Кизяков, 2005; Кизяков, Лейбман,

2005; Лейбман и др., 2000; Романенко, 1998; Cherkashov et al., 1999; Kizyakov et al., 2003; Kizyakov, Perednya, 2003; Streletskaaya et al., 2003]. Механизм развития этих форм в общих чертах схож во всех районах.

Формирование термоцирка начинается с момента, когда кровля залежи пластового льда оказывается затронутой сезонным или многолетним протаиванием в результате климатически обусловленного увеличения глубины протаивания или локального снижения поверхности под действием процессов денудации, а также биогенных и техногенных процессов [Лейбман и др., 2000; Лейбман, 2004]. Сокращение мощности перекрывающих лед отложений может быть вызвано их частичным сносом склоновыми процессами, например криогенными оползнями скольжения, развивающимися в верхней части склонов. На начальном этапе формирования термоцирка термоденудация проявляется в виде оползней течения по пластовому льду, к образованию которых приводит таяние кровли залежи льда и увлажнение отложений. В результате направленного протаивания и выноса пород криогенными оползнями течения происходит все большее обнажение пласта льда, образуется крутая отступающая тыловая стенка и формируется циркообразное понижение.

В стадии активного развития термоцирка ведущими процессами, определяющими рост формы, выступают таяние льда и протаивание мерзлых пород, вскрывающихся в стенках. Вода, образующаяся при таянии льда, формирует промоину, а затем и овраг в подножии склона, открывающийся к морю. По этому оврагу происходит удаление оттаявшего и снесенного сверху материала.

До сих пор не проводилось предметных исследований, направленных на выявление факторов, определяющих величину термоденудации в термоцирках, связанных с пластовыми льдами. Тем не менее можно привлечь к обсуждению результаты подробных, всесторонних исследований термоденудации на береговых уступах [Арэ, 1980; Арэ, Молочушкин, 1965] и стенках карьеров, выработок [Максимов, 1992; Shur et al., 2002] в восточном секторе Российской Арктики в условиях мощного жильного комплекса и отсутствия пластовых льдов.

В статье рассматриваются результаты натурных и камеральных исследований на Карском побережье Югорского п-ова, в районе с широким распространением залежей пластовых льдов.

#### ХАРАКТЕРИСТИКА КЛЮЧЕВОГО УЧАСТКА ЮГОРСКИЙ

Изучение рельефообразующих процессов в условиях распространения пластовых льдов проводилось на Югорском п-ове (рис. 1) на участке



Рис. 1. Ключевые участки изучения термоденудационных процессов на Югорском полуострове.

побережья восточнее пос. Амдерма протяженностью около 46 км [Кизяков, 2005; Кизяков, Лейбман, 2005; Лейбман и др., 2000; Cherkashov et al., 1999]. Район находится в зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород с температурой  $-3...-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  и мощностью 100–400 м [Геокриология СССР..., 1988]. Глубина сезонного протаивания составляет в среднем 0,8–1,0 м, однако в торфе снижается до 50 см, а в песке может превышать 1,5 м.

Из-за различия в геологическом строении побережья изучаемый участок делится на две части. В западной части района от пос. Амдерма до устья р. Первая Песчаная в береговом уступе вскрываются коренные породы, перекрытые чехлом рыхлых отложений. В районе устья р. Первая Песчаная на протяжении 5 км кровля коренных пород опускается ниже уровня моря и вновь появляется выше уреза у м. Нгарка-Пэсалья. Таким образом, коренные породы обнажаются в береговом обрыве на протяжении 15,2-километрового участка восточнее пос. Амдерма. В восточной части района море подрезает грядово-холмистую равнину, сложенную многолетнемерзлыми четвертичными отложениями.

На ключевом участке в районе устья р. Хубтыя береговые уступы террасовидной поверхности с высотами 8–12 м сложены суглинками. К западу высота береговых уступов возрастает до 15–25 м, в верхней части появляется увеличивающая свою мощность толща песков, перекрывающих суглинки. Далее на протяжении 1 км береговых обнажений кровля суглинков уходит ниже уреза моря, и весь береговой уступ высотой 15–20 м и крутизной до  $40^{\circ}$  сложен слоистой песчаной толщей. В урочище Шпиндлер в районе изучаемых термоцирков, в 1,5 км от устья р. Хубтыя, и западнее их береговые уступы высотой от 12 до 25 м сложены слоистой суглинистой толщей мощностью 6–15 м, перекрытой косослоистыми песками мощностью до 6–12 м. На некоторых участках берега кровля суглинистой толщи опускается ниже уровня моря, и в береговых уступах вскрывается только песчаный комплекс.

В тыловых стенках активно развивающихся береговых термоцирков вскрываются залежи пластового льда. Мощность ледяных тел составляет 4–12 м. Встречаются разрезы с двумя ярусами пластовых льдов. Пластовые льды, залегающие в средней и нижней частях разрезов, являются важным элементом геокриологического строения района, они широко распространены также и на приуральском побережье Байдарацкой губы [Коняхин и др., 1991; Мельников, Спасивцев, 1995, 2000].

Повторно-жильные льды играют существенно меньшую роль в развитии процессов термоденудации. На Югорском п-ове они формируются в основном на низких высотных уровнях, где с их развитием связан полигональный рельеф. На высоких поверхностях ледяные и ледогрунтовые жилы развиты в песчаных отложениях и имеют довольно редкое распространение – на 300 м обнажения вскрываются две-три жилы. Высота таких жил до 5 м, ширина в верхней части до 1 м.

На побережье Югорского п-ова морфологически выделяется ряд поверхностей, сложенных четвертичными породами. В прибрежной зоне авторами выделены: вершинный комплекс гряд и увалов высотой 45–70 м предположительно докаргинского возраста ( $m, mlQ_{II} - Q_{III}^3$ ); поверхность высотой 35–45 м каргинско-сартанская ( $g?m, ml?Q_{III}^{3-4}$ ); поверхность высотой 25–35 м сартанского возраста ( $g?m, ml?Q_{III}^4$ ); сартанско-голоценовая поверхность высотой 15–25 м ( $m, ml, laQ_{III}^4 - Q_{IV}$ ) и голоценовая первая морская терраса высотой 8–12 м ( $m, mlQ_{IV}$ ). В устьях рек расположена современная лайда ( $m, mlQ_{IV}$ ) высотой до 5 м.

Весь изучаемый участок находится в пределах одной литодинамической системы, в которой генеральный вдольбереговой поток наносов направлен с запада на восток. Выделение локальных береговых систем следующего, более низкого, ранга вызвано наличием в западной части района двух мысов, сложенных более устойчивыми к абразии скальными породами и являющихся барьерами для потока наносов. Материал, поступающий в бе-

реговую зону при отступании берегов, вовлекается во вдольбереговые потоки наносов, направленные в Карском море с запада на восток. Урочище Шпиндлер входит в Вайгачско-Югорский морфодинамический береговой район [Попов и др., 1988].

### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

На полевом этапе исследований в ходе маршрутных наблюдений проведены картографирование рельефа и рельефообразующих процессов прибрежной зоны, а также типизация берегов. Результатом этих работ стала геоморфологическая карта изучаемого участка, позволившая оценить распространённость термоденудационных форм рельефа и протяжённость берегов разного типа [Kizyakov et al., 2004].

Динамика роста термоцирков и скорость отступления берегов выявлены на основе повторных наблюдений на мониторинговых площадках и сопоставления современного положения бровок термоцирков и береговых уступов с результатами дешифрирования разновременных данных – аэрофото- и космоснимков, топографических карт. Для оценки динамики береговой линии и роста термоцирков за длительный период времени использовались данные дистанционного зондирования – аэрофотоснимки 1947 г., топографические карты 1969 г. и космический снимок 2001 г., а также результаты полевой топографической съёмки ключевого участка, проведенной летом 2001 г. сотрудниками ВНИИОкеангеология под руководством Ю.Г. Фирсова.

Современные скорости роста термоцирков непосредственно измерены на организованных нами мониторинговых площадках. Один полигон был создан в 2001 г. вдоль бровки центрального термоцирка урочища Шпиндлер. Вторая сеть реперов разбита в 2002 г. у бровки одного из термоцирков в районе устья р. Первая Песчаная. Полученные скорости отступления стенок термоцирков позволили рассчитать объемы выносимого материала из термоцирков и сопоставить их с количеством материала, поступающего в море при отступании термоабразионных берегов.

Помимо определения величины отступления бровок термоцирков, проводились измерения величины стаивания (термоденудации) ледяной стенки в термоцирках. Для этого перпендикулярно стенке льда забуривались два маркера и через сутки определялась мощность стаявшего слоя льда. Для того чтобы изучить факторы, влияющие на интенсивность стаивания стенки льда, маркеры устанавливались в различных условиях экспозиции и крутизны стенки, а также в разных типах льда.

В ходе полевого исследования береговая линия ключевого участка разбита на сегменты с различными типами берегов в зависимости от соотно-

шения скоростей термоабразии и термоденудации на береговом клифе. При наложении разделенной на сегменты береговой линии на геоморфологическую карту выделены элементарные участки берегового уступа, в пределах которых каждому контуру рельефа побережья соответствует один динамический тип берега.

Выявленные скорости отступления берегов позволили спрогнозировать положение береговой линии через 50 лет. Прогноз основан на предположении, что скорости отступления берегов останутся постоянными в пределах выделенных на современном этапе элементарных участков берега, которым соответствует один динамический тип берега, одна геолого-геоморфологическая единица поверхности приморья. Каждому участку присвоена информация о скорости отступления береговой линии, прогнозы величины отступления на 50 лет и объема выносимого материала.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ Деструкция на Югорском полуострове

#### *Формирование термоцирков и термотеррас.*

Термотеррасы образуются в условиях вскрытия залежи пластового льда в стенке берегового уступа, отступающего параллельно самому себе [Кизяков, 2004]. В развитии этих форм ведущая роль принадлежит комплексу термоденудационных процессов, развивающихся на береговом уступе и связанных с вытаяванием льда. Оттаявшие и достаточно увлажненные отложения верхнего уступа термотеррасы, залегающие над пластом льда, зачастую сползают крупными блоками. В результате такого сползания верхний уступ термотеррасы продвигается в глубь суши, и увеличивается площадь самой термотеррасы. Мы наблюдали отрыв и скольжение глинистого материала с верхнего уступа высотой 18–20 м. Оползневое тело за несколько секунд миновало площадку террасы и остановилось на пляже, частично выдвинувшись в прибойную зону. Размеры оползневое тела, перекрывшего пляж, 25×25 м, мощность около 1,5 м.

Термотеррасы выделены на участках берега с наличием пластовых льдов, где высокий (18–25 м) уступ отделен от моря ступенью высотой 8–15 м – сниженной поверхностью с останцами, разделенными оврагами и промоинами.

Ширина площадки термотеррасы в конечном счете определяется разностью скоростей отступления верхнего уступа термотеррасы за счет термоденудации и нижнего уступа за счет термоабразии [Арз и др., 2004]. Наблюдающиеся в настоящее время термотеррасы свидетельствуют, что на участках их распространения скорость термоабразионного отступления береговой линии меньше скорости отступления стенки с вскрывающимся пластом льда.

Термоцирки, открывающиеся к морю узкими оврагами, формируются в результате вскрытия кровли залежи пластовых льдов термоденудационными процессами в глубине суши. На изучаемом участке побережья авторы отметили по меньшей мере 15 отрезков с термоцирками, каждый шириной от 0,2 до 1 км. Размеры термоцирков зависят от возраста формы и достигают 500 м в поперечнике, глубина их составляет от 5 до 30–40 м. Большое количество тонкозернистого материала также выносится из каньонообразных оврагов. Формирующиеся на узком пляже конусы выноса подрезаются во время приливов. Наиболее интенсивно они размываются во время штормовых нагонов.

Большая часть работ по изучению динамики термоцирков проводилась в районе урочища Шпиндлер в 2 км к западу от устья р. Хубтьяха. Изучалась группа из трех термоцирков, которые врезаются в поверхность высотой 35–45 м предположительно каргинско-сарганского возраста. Центральный термоцирк, в котором были сконцентрированы работы, имеет размеры 200 × 300 м и глубину порядка 35–40 м. В его крутой (до 60–70°) тыловой стенке вскрываются две толщи льда на высоте 7–12 и 20–33 м над уровнем моря.

Соседние восточный и западный термоцирки в настоящее время перешли в стадию стабилизации. Практически вся залежь пластового льда вытаяла, и лед встречается лишь в виде редких небольших фрагментов, обнажающихся не каждый год. На задернованных склонах, более пологих, чем в центральном термоцирке, развиваются криогенные оползни скольжения и солифлюкция.

Еще два прибрежных термоцирка, развивающихся по выходам пластовых льдов, изучались в районе устья р. Первая Песчаная в 7 км восточнее пос. Амдерма. Цирки заложены в прибровочной части термокарстового понижения на холмистоувалистой поверхности высотой 20–40 м, подрезаемой морем. До 2003 г. восточный термоцирк имел полукруглую форму, ширина его вдоль берега составляла 200–220 м, врез в глубь суши 100–150 м. Превышение бровок цирка над днищем от 5 до 12 м; видимая мощность пластового льда 2–6 м. Активизация этого цирка произошла в 2000 г., когда вскрылся пласт льда. В настоящее время (по наблюдениям 2005 г.) он значительно расширился, врезался в более высокую поверхность склона, превышение бровок над днищем достигло 16–20 м, а врез в глубь суши на отдельных участках увеличился до 210 м.

Западный термоцирк, так же как и восточный, заложен в термокарстовом понижении с высотой около 20 м над уровнем моря. Этот термоцирк находится в современной стадии активного роста с 2001 г., до этого обнажение льда было перекрыто склоновыми отложениями. Ширина термоцирка в 2001 г. составляла 180–200 м, высота стенок до 10 м. К лету 2003 г. ширина увеличилась на 15–

20 м. Лед вскрывается в виде пласта мощностью 3–7 м. Главной особенностью этого цирка, выделяющей его среди всех изученных, является наличие кристаллических пород, выходящих на поверхность в устье цирка у береговой линии. Подошву пласта льда обнаружить не удалось. Видимая нижняя граница льда на 3–4 м выше кровли кристаллических пород, но контактная зона не вскрывается, что затрудняет определение взаиморасположения подошвы льда и кровли коренных пород.

В 2005 г. вблизи бровки обнаружены свежие оползни течения, а также ниша в останце восточного борта термоцирка, вскрывающая пластовую залежь. Таким образом, после нескольких лет относительно стабильного состояния произошла резкая активизация развития термоцирков участка Первая Песчаная.

К устьям оврагов и активных термоцирков приурочены конусы выноса, формирующиеся на пляже. Эти конусы могут полностью перекрывать весь пляж шириной 6–15 м и выступать в море до 15–20 м, меняя рисунок береговой линии.

*Парагенез термоденудации и термоабразии на берегах.* Береговая зона в пределах изучаемого участка представляет собой отмель, изобаты протягиваются параллельно береговой линии. Высокие скорости отступания берегов и поступление большого объема материала в береговую зону обусловили формирование аккумулятивного типа подводного склона с подводными береговыми валами. Этими факторами определяется образование выровненного контура береговой линии, характерного для берегов, находящихся с динамической точки зрения в стадии зрелости.

Берег с выходами скальных пород в западной части участка абразионный на всем протяжении, небольшие фрагментарные участки галечного пляжа занимают только углубления между выступающими скалами. Участки аккумуляции, как правило, приурочены к устьям рек, впадающих в Карское море. Устья рек отделены от моря широкими (до 160 м) песчаными валами с галечной отмосткой в верхней части пляжа.

В развитие типизации берегов, предложенной В.А. Совершаевым [1992], мы выделили три типа отступающих берегов, сложенных мерзлыми четвертичными отложениями, в зависимости от соотношения скоростей термоабразии и термоденудации: абразионные (термоабразионные), абразионно-термоденудационные и термоденудационные. Эти три типа характеризуют различные механизмы разрушения берегов, однако разделение это весьма условно и сделано с целью более подробного картографирования береговой линии исследуемого района. Для термоабразионного берега характерны явно выраженные формы рельефа, связанные с непосредственным воздействием волн: наблюдаются следы подрезания берегового откоса, вырабатываются волноприбойные ниши. Эти участки берега

подвергаются воздействию волн только во время нагонов и осенних штормов. В случае, когда волны не вырабатывают ниши и не являются ведущим фактором разрушения берега, существенную роль может играть смещение отложений вниз по склону в результате развития термоденудационных процессов на береговом уступе. Такие берега относятся к абразионно-термоденудационным. Термоденудационные берега развиваются в основном за счет термоденудационных процессов на уступе. Берега такого типа выделены на участках развития термотеррас, а также на относительно стабильных участках в районе устьев крупных оврагов, термоцирков, рек, они имеют небольшую протяженность.

В верхней части крутых (до 80°) уступов термоабразионных и абразионно-термоденудационных берегов развивается комплекс склоновых процессов – осыпания, обваливания и делювиального смыва. С двучленным литологическим строением связана выпуклая форма поперечного профиля береговых уступов. У береговых уступов высотой 18–20 м в самой верхней части, сложенной песками, наблюдается почти отвесный участок с небольшим козырьком, образованным слоем дернины, ниже в пределах песчаного слоя крутизна уступа снижается до 30–40°. Крутизна этой части нередко превышает угол естественного откоса для песка из-за некоторого увлажнения пород при протаивании и сохранения сцепления благодаря присутствию небольшого количества материала алевритовой и пелитовой размерности. В залегающей ниже по разрезу толще глины крутизна уступа возрастает до 70–80° вследствие большей устойчивости глины к обрушению. Крутой угол поддерживается за счет постоянного удаления прибоем во время приливов и нагонов обрушающегося материала, накопившегося у подножия склона. В самой нижней части некоторых береговых уступов наблюдаются следы подрезания их волнами – волноприбойные ниши. В результате обрушения материала над нишами образуются отвесные стенки высотой до 2–4 м.

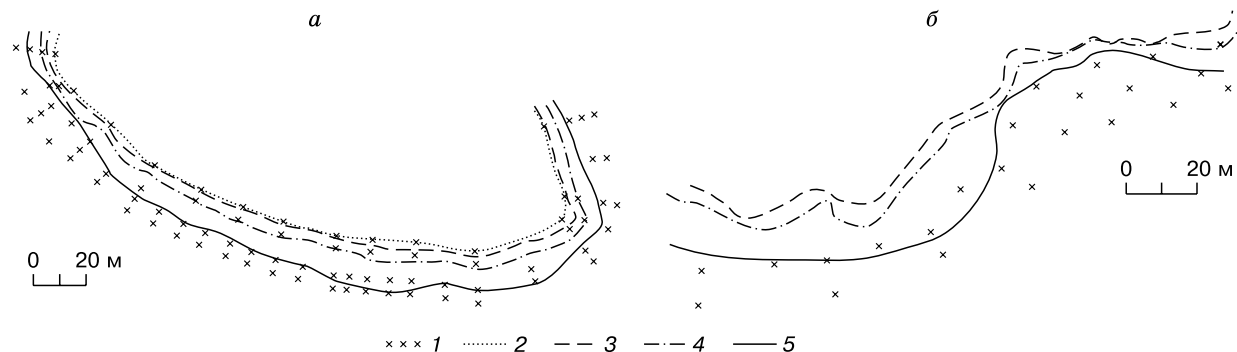
Наибольшую протяженность среди берегов, сложенных мерзлыми четвертичными отложениями, имеют берега абразионно-термоденудационного типа – более четверти длины изучаемого участка. Наименьшее распространение у термоденудационных берегов – 9,6 км (примерно 6 % длины участка). При этом на термотеррасы, как активно развивающиеся, так и стабилизировавшиеся, приходится 2,7 км береговой линии, что составляет почти треть протяженности термоденудационных берегов. Суммарная протяженность береговой линии, приходящейся на устья активных термоцирков и береговые уступы с вскрывающимся пластывым льдом, составляет порядка 1,5 км, или около 3 % общей длины изучаемого побережья.

В целом побережье Югорского п-ова представляет собой сочетание участков выровненных берегов, отступающих параллельно самим себе, и участков с термоцирками, где прибрежная зона отступающего берега продолжается в глубь суши на 200–400 м до тыловых стенок термоцирков. Во втором типе побережий зона взаимного влияния моря и суши значительно увеличивается, усложняется комплекс процессов разрушения берегов и выноса обломочного материала в береговую зону.

Пляжи на изучаемом участке неполного профиля шириной от 3 до 6–8 м сложены песком с небольшим количеством гальки. В устьях ручьев и крупных оврагах ширина пляжа увеличивается до 17 м, в верхней части наблюдается галечная отмостка шириной 4–6 м, ниже которой пляж песчано-галечный. В ряде случаев галька бывает заброшена на подножие берегового уступа на высоту до 2 м.

### Темпы деструкции

*Скорость роста термоцирков.* В результате сопоставления дистанционных данных и материалов полевой топографической съемки 2001 г. определены средние многолетние скорости роста термоцирков урочища Шпиндлер, составившие 0,6–1,0 м/год за период 1947–2001 гг. Современные



**Рис. 2.** Положение бровки центрального термоцирка ключевого участка Шпиндлер (а) и восточного термоцирка ключевого участка Первая Песчаная (б).

1 – местоположение измерительных колов; 2–5 – линии бровки термоцирков в разные годы: 2 – 2001; 3 – 2002; 4 – 2003; 5 – 2005.

Таблица 1.

**Температурные условия проведения наблюдений за отступанием бровки центрального термоцирка урочища Шпиндлер, по данным с сервера Погода России (<http://meteo.infospace.ru>)**

Период измерений	Отступление бровки термоцирка*, м			Количество дней между наблюдениями	Количество дней с положительной температурой воздуха	Сумма положительных температур воздуха, °С
	макс.	мин.	сред.			
16.09.2001 г.–10.08.2002 г.	3,4	0,3	1,6	328	77	398,4
10.08.2002 г.–22.08.2003 г.	5,8	2,3	4,2	377	122	755,2
22.08.2003 г.–05.08.2005 г.	13,3 (6,35)	2,0 (1,0)	7,65 (3,83)	714	252	1401,9

\* В скобках – скорость отступления, м/год.

измеренные скорости роста термоцирков урочища Шпиндлер и термоцирков в районе устья р. Первая Песчаная составляют в среднем 1,6–4,2 м/год, максимальные достигают 5,8–6,3 м/год (рис. 2).

Межгодовая изменчивость скоростей (средних – от 1,6 до 4,2 м/год и максимальных – от 3,4 до 5,8 м/год) определяется различием годовых сумм положительных температур воздуха (табл. 1), которые за период наблюдений увеличились почти вдвое [Кизяков, 2005].

Заниженные величины скорости роста термоцирков, осредненные за полувековой период, свидетельствуют о том, что в развитии термоцирков с 1947 по 2001 гг. наблюдались периоды стабилизации, которые могли быть связаны с временным захоронением залежей льда обрушившимися сверху отложениями. Современные скорости развития термоцирков Югорского п-ова, измеренные авторами, близки к темпам роста этих форм на п-ове Ямал [Воскресенский, 2001; Дубиков, 2002] и на о. Колгуев [Perednya et al., 2003].

Скорость отступления ледяной стенки, за исключением редких случаев, является верхним пределом термоденудации для местных климатических условий [Арз, 1980]. Нами определялась суточная скорость отступления стенки пластового льда в термоцирках и ее зависимости от метеорологических параметров, экспозиции, угла наклона

стенки и типа льда. В зависимости от сочетания этих факторов измеренные скорости стаивания льда изменяются от 6 до 12,3 см/сут.

Суточные скорости стаивания льда, измеренные во второй половине августа, по-видимому, близки к максимальным за год. Минимальные скорости наблюдаются в период с отрицательными среднесуточными температурами и постепенно возрастают в начале лета по мере увеличения среднесуточных температур воздуха. Осенью наблюдается падение скоростей роста термоцирков и постепенное их затухание после перехода среднесуточных температур через 0 °С.

*Вынос материала из термоцирков.* Проведен расчет объема выносимого материала из центрального термоцирка урочища Шпиндлер за период 1947–2001 гг. Расчетный среднегодовой вынос материала без учета объема вытаявшего льда составлял примерно 1780 м<sup>3</sup>/год. Суммарный ежегодный объем вынесенного материала, включая лед, около 2680 м<sup>3</sup>.

Инструментальное измерение положения бровки термоцирка в 2001, 2002, 2003 и 2005 гг. позволило вычислить объем современного выноса материала. В первый год наблюдений из термоцирка было вынесено 8900 м<sup>3</sup> без учета льда, во второй год – в 2,5 раза больше – 23 000 м<sup>3</sup> без учета льда (табл. 2). Интенсивный рост термо-

Таблица 2. **Расчет объема материала, вынесенного комплексом деструктивных процессов из центрального термоцирка урочища Шпиндлер в разные периоды времени**

Годы	Среднее по цирку отступление бровки, м	Площадь прироста термоцирка, м <sup>2</sup>	Общий объем вынесенного материала (включая лед), м <sup>3</sup>	Объем вынесенных отложений, м <sup>3</sup>			Масса вынесенного материала, т	
				Глина	Песок, гравий	Сумма	Порода	Лед
1947–2001	43	7968	145 000	38 400	57 600	96 000	172 000	44,1
2001–2002	1,6	415	13 500	3560	5340	8900	16 000	4,14
2002–2003	4,2	1080	35 100	9200	13 800	23 000	41 000	10,9
2003–2005*	7,6 (3,8 м/год)	1970 (985 м <sup>2</sup> /год)	64 000 (32 000 м <sup>3</sup> /год)	16 900 (8450 м <sup>3</sup> /год)	25 300 (12 650 м <sup>3</sup> /год)	42 200 (21 100 м <sup>3</sup> /год)	75 500 (37 800 кг/год)	19,6

\* В скобках указаны среднегодовые скорости роста соответствующих величин.

цирка продолжился и в 2003–2005 гг., за два года вынос материала из цирка составил в среднем 21 100 м<sup>3</sup>/год без учета льда.

Расчеты объема выносимого материала позволили количественно оценить геохимическое влияние процессов деструкции берегов Югорского п-ова. Все многообразие пород, слагающих мерзлые берега исследованного участка, можно разделить на две группы – сильнозасоленные глинистые и промытые (слабозасоленные) песчаные. В группу глинистых пород мы включили суглинки и глину, а в группу песчаных – пески и супеси. Было отобрано более 50 образцов мерзлых пород, слагающих стенки термоцирков, и определено содержание катионов и анионов.

При расчетах использовались следующие исходные данные: весовая влажность и плотность для группы глинистых пород принимались равными 35 % и 1,7 г/см<sup>3</sup>, для группы песчаных пород – 25 % и 1,9 г/см<sup>3</sup> соответственно.

Данные 6-компонентного ионного анализа водных вытяжек были осреднены для каждой группы. Определялось также содержание воднорастворимых солей в пластовом льду.

Результаты расчетов поступления ионов воднорастворимых солей в береговую зону моря представлены в табл. 3, 4. Они получены на базе расчетов объема и массы вынесенного в море материала различного состава за разные периоды времени (см. табл. 2) для центрального термоцирка ключевого участка Шпиндлер.

В табл. 3 приведены данные о суммарном количестве воднорастворимых солей, поступивших в прибрежную зону за периоды 1947–2001 гг. и 1947–2005 гг., а также средние величины за эти периоды и за последние годы инструментальных измерений. Сравнение среднего значения за период 1947–2001 гг. (2,4 т) с данными, основанными на инструментальных наблюдениях, за период 2001–2005 гг. (среднее за четыре года – 25,4 т) показало их различие на порядок. Это соответствует представлениям о стадийности (или цикличности) в развитии термоцирков. Данные за период с 2001 по 2005 г. характеризуют активную стадию развития центрального термоцирка ключевого участка Шпиндлер.

В общем объеме поступающего в море материала масса песчаных пород превышает массу глинистых почти в 2 раза. При этом масса солей, поступающих при их разрушении, значительно меньше (примерно в 4 раза), чем при разрушении глинистых пород. Это связано с их на порядок меньшим засолением (см. табл. 3).

Итоговый результат показывает, что количество поступающих в береговую зону моря воднорастворимых солей, содержащихся в мерзлой породе (без учета содержания солей во льду на этапе активного развития термоцирка), составляет 2–6 т/год для песков и 10–25 т/год для глин.

В табл. 4 представлены данные о вкладе вытаявшего расчетного объема льда (массы вытаявшей воды) центрального термоцирка за периоды 1947–2001 гг. и 2001–2005 гг. в вынос воднорастворимых солей. Из анализа таблицы следует, что суммарный вклад воднорастворимых солей, поступающих в море при вытаивании пластового льда, на два порядка меньше, чем при попадании в море продуктов термоденудации мерзлых пород. Среднее многолетнее значение за 1947–2001 гг. равно 18,8 кг, а за последние четыре года оно составило 200 кг.

Просуммировав все полученные данные, мы оценили общую массу воднорастворимых солей, поступивших в море в результате термоденудационных процессов на участках с пластовыми льдами ключевого участка Шпиндлер за последние 58 лет, которая составила 224,5 т, причем почти половина этой величины приходится на последние четыре года.

*Отступление морских берегов.* Средние скорости отступления берегов Югорского п-ова, определенные на основе анализа данных дистанционного зондирования за период 1947–2001 гг., находятся в диапазоне 0,6–1,1 м/год. В осредненных за полувековой период скоростях не прослеживается различий для выделенных типов берегов, которые не являются постоянными и изменяются во времени. По-видимому, различия в скоростях, определяющие тип берега и морфологию берегового уступа, проявляются на более коротких временных отрезках.

Полученные данные о скоростях отступления берегов распространены на весь участок, сложный нелигифицированными осадочными породами, и проведен расчет объема материала, выносимого в береговую зону, для берегов разного типа [Кизяков, 2005]. Суммарный ежегодный вынос материала с 26-километрового берега за счет термоабразии и склоновых процессов на береговом откосе без учета поступлений из термоцирков и выноса рек составил 364 500–633 200 м<sup>3</sup>. В среднем с 1 км берега поступает 13 100–26 100 м<sup>3</sup>/год.

Вклад термоцирков в баланс наносов может достигать в активные годы 10 % от объема материала, образующегося при отступании исследуемой части побережья Югорского п-ова. Береговые термоцирки обладают большим водосбором, значительной протяженностью отступающих стенок, находящихся в глубине суши, и узким устьем, через которое происходит концентрированный вынос материала. Как следует из наших исследований, скорости термоденудационного отступления бровок термоцирков могут в 2–5 раз превышать скорости термоабразионного разрушения берегов. Из устьев термоцирков в годы их активного развития происходит концентрированный вынос материала в береговую зону, сопоставимый с поступлением материала с 500–1000 м участка термоабразионного берега.



Таблица 3. Расчет содержания солей в породах

Группа пород	Масса сухой породы, т	Содержание водно-растворимых солей, т						
		K+Na	Mg	Ca	Cl	SO <sub>4</sub>	HCO <sub>3</sub>	Сумма
<i>Сумма (1947–2001 гг.)</i>								
Глины	42 432	33,03	1,14	2,50	25,06	28,83	15,69	106,23
Пески	82 080	4,76	0,95	2,24	4,05	9,91	3,07	24,97
Сумма	124 512	37,79	2,09	4,74	29,11	38,74	18,76	131,20
<i>Среднее многолетнее значение (1947–2001 гг.)</i>								
Глины	786	0,61	0,02	0,05	0,46	0,53	0,29	1,97
Пески	1520	0,09	0,02	0,04	0,08	0,18	0,06	0,46
Сумма	2306	0,70	0,04	0,09	0,54	0,71	0,35	2,43
<i>Сумма (2001–2002 гг.)</i>								
Глины	3934	3,06	0,11	0,23	2,32	2,67	1,45	9,85
Пески	7610	0,44	0,09	0,21	0,38	0,92	0,28	2,32
Сумма	11 544	3,50	0,20	0,44	2,70	3,59	1,73	12,17
<i>Сумма (2002–2003 гг.)</i>								
Глины	10 166	7,91	0,27	0,60	6,00	6,91	3,76	25,45
Пески	19 665	1,14	0,23	0,54	0,97	2,37	0,74	5,98
Сумма	29 831	9,05	0,50	1,14	6,97	9,28	4,50	31,43
<i>Среднее годовое значение (2003–2005 гг.)</i>								
Глины	9337	7,27	0,25	0,55	5,51	6,34	3,45	23,38
Пески	18 026	1,04	0,21	0,49	0,89	2,18	0,67	5,48
Сумма	27 363	8,31	0,46	1,04	6,40	8,52	4,12	28,86
<i>Сумма (1947–2005 гг.)</i>								
Глины	75 207	58,54	2,01	4,43	44,41	51,09	27,80	188,29
Пески	145 408	8,43	1,68	3,97	7,18	17,56	5,44	44,24

Таблица 4. Расчет содержания солей в пластовом льду

Лед, порода	Масса вытаявшей воды, т	Содержание водно-растворимых солей, 10 <sup>-3</sup> т						
		K+Na	Mg	Ca	Cl	SO <sub>4</sub>	HCO <sub>3</sub>	Сумма
<i>Сумма (1947–2001 гг.)</i>								
Лед	44 100	95,9	45,8	119,7	93,8	103,7	555,7	1012,7
<i>Среднее многолетнее значение (1947–2001 гг.)</i>								
Лед	810	1,8	0,8	2,2	1,7	1,9	10,3	18,8
<i>Сумма (2001–2002 гг.)</i>								
Лед	4140	9,0	4,3	11,2	8,8	9,7	52,5	95,1
<i>Сумма (2002–2003 гг.)</i>								
Лед	10 900	23,7	11,3	29,6	23,2	25,6	137,4	250,3
<i>Среднее годовое значение (2003–2005 гг.)</i>								
Лед	9800	21,3	10,2	26,6	20,8	23,0	123,5	225,0
<i>Сумма (1947–2005 гг.)</i>								
Лед	78 740	171,2	81,8	213,7	167,5	185,2	992,3	1808,1
<i>Среднее многолетнее значение (1947–2005 гг.)</i>								
Лед	1358	3,0	1,4	3,7	2,9	3,2	17,1	31,2
Сумма	220 614	66,97	3,69	8,40	51,58	68,65	33,24	232,53
<i>Среднее многолетнее значение (1947–2005 гг.)</i>								
Глины	1297	1,01	0,03	0,08	0,77	0,88	0,48	3,25
Пески	2507	0,15	0,03	0,07	0,12	0,30	0,09	0,76
Сумма	3804	1,16	0,06	0,15	0,89	1,18	0,57	4,01

Сделан прогноз отступления берегов на 50 лет и проведен расчет объема материала, который поступит в береговую зону. При сохранении определенных за период 1947–2001 гг. темпов отступления береговая линия за следующие 50 лет сместится в глубь суши в среднем на 30–50 м. С использованием данных о величине отступления и информации с геоморфологической карты выполнен расчет объема материала, который поступит в береговую зону при прогнозируемом отступании береговой линии. С участка общей протяженностью 46,4 км прогнозируемый объем размыва надводной части берегов составит 17,5 млн м<sup>3</sup> за 50 лет, в среднем 0,35 млн м<sup>3</sup>/год. Более половины этой величины приходится на берега абразионно-термоденудационного типа, которые на современном этапе имеют наибольшую протяженность – 12,5 км.

### ВЫВОДЫ

Проведено исследование многолетней и современной динамики процессов деструкции на побережье Югорского п-ова (Карское море). Присутствие в разрезе залежей пластовых подземных льдов обуславливает значительное участие термоденудации в разрушении полосы побережья. Характерными интенсивно развивающимися денудационными формами рельефа являются термоцирки и термотеррасы. В случае вскрытия кровли залежи пластового льда термоденудационными процессами в глубине суши образуются термоцирки. Термотеррасы развиваются при вскрытии пластового льда в стенке берегового уступа, отступающего параллельно самому себе.

Различные соотношения скоростей термоабразии и термоденудации на береговых уступах определили различия в морфологии берегов и позволили выделить термоабразионные, абразионно-термоденудационные и термоденудационные типы берегов.

Скорости термоденудационного отступления бровок термоцирков могут в 2–5 раз превышать скорости термоабразии морских берегов. При этом из устьев термоцирков в годы их активного развития происходит концентрированный вынос материала в береговую зону, сопоставимый с поступлением материала с 500–1000-метрового участка термоабразионного берега. В условиях Югорского п-ова вынос материала из устьев термоцирков может достигать 10 % от объема материала, поступающего в береговую зону при термоабразионном разрушении берегов.

Вынос материала из термоцирков за последние четыре года составляет почти половину суммарного выноса из термоцирка за 58 лет. При этом глинистые породы поставляют примерно в пять раз больше водно-растворимых солей, чем песчаные.

### Литература

- Арз Ф.Э.** Развитие рельефа термоабразионных берегов // Изв. АН СССР. Сер. геогр., 1968, № 1, с. 92–100.
- Арз Ф.Э.** Термоабразия морских берегов. М., Наука, 1980, 159 с.
- Арз Ф.Э., Григорьев М.Н., Хубберген Х.-В., Рахольд Ф.** Определение скорости отступления термоабразионных берегов по размерам термотеррас // Материалы Междунар. конф. „Криосфера Земли как среда жизнеобеспечения” (Пушино, 26–28 мая 2003 г.). М., ЗАО „ОЛИТА”, 2003, с. 235–236.
- Арз Ф.Э., Григорьев М.Н., Рахольд Ф., Хубберген Х.-В.** Определение скорости отступления термоабразионных берегов по размерам термотеррас // Криосфера Земли, 2004, т. VIII, № 3, с. 52–56.
- Арз Ф.Э., Молочушкин Е.Н.** Скорость разрушения арктических обрывов Якутии под действием термоденудации // Процессы тепломассообмена в мерзлых горных породах. М., Наука, 1965, с. 130–138.
- Васильев А.А.** Динамика термоабразии морских берегов Западного Ямала // Тез. докл. Междунар. конф. „Ритмы природных процессов в криосфере Земли”. Пушино, 2000, с. 112–113.
- Васильев А.А.** Результаты многолетнего мониторинга разрушения морских берегов западного сектора Российской Арктики // Материалы Междунар. конф. „Экология северных территорий России. Проблемы, прогноз ситуации, пути развития, решения”. Т. 1. Архангельск, 2002, с. 493–497.
- Васильев А.А., Покровский С.И.** Оценка баланса материала при разрушении морских берегов (на примере Марре-Сале, Западный Ямал) // Тез. докл. Междунар. конф. „Консервация и трансформация вещества и энергии в криосфере Земли”. Пушино, 2001, с. 186–187.
- Воскресенский К.С.** Современные рельефообразующие процессы на равнинах Севера России. М., Изд-во МГУ, 2001, 262 с.
- Воскресенский К.С., Совершаев В.А.** Роль экзогенных процессов в динамике арктических побережий // Динамика арктических побережий России. М., Изд-во МГУ, 1998, с. 35–48.
- Геокриология СССР** (Европейская территория СССР) / Под ред. Э.Д. Ершова. М., Недра, 1988, 358 с.
- Григорьев М.Н.** Закономерности процессов термоабразии и термоденудации берегов арктических морей (на примере ключевых участков побережья моря Лаптевых) // Материалы Первой конф. геокриологов России. Кн. 1, ч. 3. Динамическая геокриология. М., Изд-во МГУ, 1996, с. 504–511.
- Дубиков Г.И.** Состав и криогенное строение мерзлых толщ Западной Сибири. М., ГЕОС, 2002, 246 с.
- Кизяков А.И.** Специфические формы рельефа области развития подземных пластовых льдов // Материалы Моск. центра рус. геогр. о-ва. Биогеография. М., РАСХН, 2004, вып. 12, с. 95–101.
- Кизяков А.И.** Динамика термоденудационных процессов на побережье Югорского полуострова // Криосфера Земли, 2005, т. IX, № 1, с. 63–67.
- Кизяков А.И., Лейбман М.О.** Термоденудационные формы рельефа районов с развитием залежей пластовых льдов на примере побережья Югорского полуострова // Материалы Третьей конф. геокриологов России. Т. 3, ч. 6. Региональная и историческая геокриология. М., Изд-во МГУ, 2005, с. 126–133.

- Коняхин М.А., Амплеева Т.В., Николаев В.И.** Находка пластовых льдов в позднеплейстоценовых отложениях Байдарацкой губы // *Материалы гляциол. исслед.*, 1991, вып. 72, с. 227–228.
- Лейбман М.О.** Механизмы и стадии развития склоновых криогенных процессов Западного сектора Арктики // *Рельефообразующие процессы: теория, практика, методы исследования*. Новосибирск, ИГ СО РАН, 2004, с. 160–162.
- Лейбман М.О., Кизяков А.И., Арчегова И.Б., Горланова Л.А.** Этапы развития криогенного оползания на Югорском полуострове и Ямале // *Криосфера Земли*, 2000, т. IV, № 4, с. 67–75.
- 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.
- Мельников В.П., Спесивцев В.И.** Инженерно-геологические и геокриологические условия шельфа Баренцева и Карского морей. Новосибирск, Наука, 1995, 198 с.
- Мельников В.П., Спесивцев В.И.** Криогенные образования в литосфере Земли (изобразительная версия). Новосибирск, НИЦ ОИГТМ СО РАН, Изд-во СО РАН, 2000, 343 с.
- Морская геоморфология** / Под ред. В.П. Зенковича, Б.А. Попова. М., Мысль, 1980, 280 с.
- Попов Б.А., Совершаев В.А., Новиков В.Н. и др.** Береговая зона морей Печорско-Карского региона // *Исследование устойчивости геосистем Севера*. М., Изд-во МГУ, 1988, с. 176–190.
- Природные условия Байдарацкой губы**. М., ГЕОС, 1997, 432 с.
- Романенко Ф.А.** Строение и динамика рельефа островов Карского моря // *Динамика арктических побережий России*. М., Изд-во МГУ, 1998, с. 131–153.
- Совершаев В.А.** Береговая зона арктических морей // *Геоэкология Севера*. М., Изд-во МГУ, 1992, с. 55–60.
- Совершаев В.А., Камалов А.М.** Устойчивость морских берегов в криолитозоне // *Там же*, с. 95–102.
- Совершаев В.А., Новиков В.Н.** Проблемы рациональной эксплуатации береговой зоны арктических морей // *Проблемы экологии полярных областей*. Вып. 2. М., Наука, 1991, с. 35–40.
- Соломатин В.И., Жигарев Л.А., Совершаев В.А.** Криогенные процессы и явления на побережье и шельфе арктических морей // *Динамика арктических побережий России*. М., Изд-во МГУ, 1998, с. 12–18.
- Cherkashov G.A., Goncharov G.N., Kizyakov A.I. et al.** Arctic coastal dynamics in the areas with massive ground ice occurrence. Woods Hole, 1999, p. 5–6.
- Kizyakov A.I., Prednaya D.D.** Destruction of coasts on the Yugorsky peninsula and on Kolguev Island, Russia // *Permafrost: 8th Intern. Conf. on Permafrost (Zurich, Switzerland, 21–25 July, 2003)*: Abstrs. Univ. of Zurich, Switzerland, 2003, p. 79–80.
- Kizyakov A.I., Prednaya D.D., Firsov Yu.G. et al.** Character of the coastal destruction and dynamics of the Yugorsky Peninsula coast // *Rep. on Polar and Marine Res., Arctic Coastal Dynamics*, AWI Bremerhaven, Germany, 2003, vol. 443, p. 47–49.
- Kizyakov A.I., Zimin M.V., Leibman M.O., Cherkashov G.A.** Mapping of the coasts of Yugorsky peninsula, Kara Sea // *Rep. on Polar and Marine Res., Arctic Coastal Dynamics*, AWI Bremerhaven, Germany, 2004, vol. 482, p. 80–83.
- Prednaya D.D., Leibman M.O., Kizyakov A.I. et al.** Coastal dynamics at the western part of Kolguev Island, Barents Sea // *Rep. on Polar and Marine Res., Arctic Coastal Dynamics*, AWI Bremerhaven, Germany, 2003, vol. 443, p. 92–94.
- Shur Yu., Vasiliev A., Kanevsky M. et al.** Shore erosion in Russian Arctic // *Cold region engineering: Proc. of the 7th Intern. Conf. (Anchorage, Alaska, 20–22 May, 2002)*. ASCE, 2002, p. 736–747.
- Streletskaya I.D., Ukraintseva N.G., Drozdov I.D.** A digital database on tabular ground ice in the Arctic // *Permafrost: Proc. of the 8th Intern. Conf. on Permafrost (Zurich, Switzerland, 21–25 July, 2003)*. Lisse, 2003, vol. 2, p. 1107–1110.

*Поступила в редакцию  
14 декабря 2005 г.*