НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
КРИОСФЕРА ЗЕМЛИ
Криосфера Земли, 2008, т. XII, № 4, с. 24–35 http://www.izdatgeo.ru

КРИОГЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ НА ШЕЛЬФЕ И НА ПОБЕРЕЖЬЕ АРКТИЧЕСКИХ МОРЕЙ

УДК 551.345+911.52

ЛАНДШАФТНЫЕ ФАКТОРЫ ИЗМЕНЕНИЯ СКОРОСТИ ТЕРМОДЕНУДАЦИИ НА ПОБЕРЕЖЬЕ ЮГОРСКОГО ПОЛУОСТРОВА

А.В. Хомутов, М.О. Лейбман

Институт криосферы Земли СО РАН,
625000, Тюмень, а/я 1230, Россия, akhomutov@gmail.com

Представлен анализ полевых наблюдений и дистанционных данных, полученных на побережье Югорского полуострова. Он направлен на выявление зависимости скорости термоденудации от особенностей ландшафтной структуры. На изучаемой территории сопоставлены линии бровок термоцирков за разные годы с границами ландшафтных комплексов, выделенных на классифицированном космическом снимке. Ландшафтные комплексы сгруппированы в соответствии с устойчивостью к отступанию бровки термоцирка под действием термоденудации – одного из ведущих береговых процессов на исследуемой территории. Критерием выделения послужила средняя из максимальных годовых скорость отступания бровки в пределах каждого ландшафтного комплекса за период наблюдений. Рассмотрены отдельные компоненты ландшафтных комплексов и проведена балльная экспертная оценка степени их влияния на скорость термоденудации. Предложена методика, позволившая выявить степень влияния ландшафтных факторов и определить наиболее весомые из них.

Термоденудация, структура ландшафтов, устойчивость, скорость отступания бровки, балльная оценка

LANDSCAPE CONTROLS OF THERMODENUDATION RATE CHANGE ON YUGORSKY PENINSULA COAST

A.V. Khomutov, M.O. Leibman

Earth Cryosphere Institute SB RAS,
625000, Tyumen, P/O box 1230, Russia, akhomutov@gmail.com

The paper presents joint analysis of field and remote-sensing data from Yugorsky Peninsula coast, which was used to determine impact of landscape components on thermodenudation rate. Thermocirque dynamics and landscape pattern of the study area were compared. Landscape pattern was studied using satellite image classification. A sequence of thermocirque edges for the period 2001–2007 and landscape complex boundaries identified on a classified image were compared. As a result, groups of landscape units are subdivided according to resistibility to thermodenudation as one of the major coastal processes on study area. The criterion for landscape grouping is an average of maximum annual retreat rates for each landscape. To analyze the resistibility of a landscape unit to coastal retreat, each component of the landscape was considered separately. A numerical score was assigned to determine the role of each retreat rate control. A procedure is suggested which allows one to reveal the rate of impact for each landscape control and range them to find the most weighty factor.

Thermodenudation, landscape structure, resistibility, edge retreat rate, numerical score

ВВЕДЕНИЕ

В основу статьи положены исследования, проведенные на ключевых участках Шпиндлер и Первая Песчаная, расположенных на побережье Югорского п-ова (рис. 1). Для района исследования характерны участки с резкой активизацией процессов термоденудации и образованием особых форм термоденудационного рельефа: термоцирков и термотеррас (см. рисунок на обложке) [*Кизяков и др., 2006*].

Влияние факторов природной среды на динамику берегов отражено в ряде работ российских и зарубежных ученых. Для прибрежно-шельфовой зоны арктических морей сведения об основных факторах динамики побережий и условиях развития прибрежно-шельфовой криолитозоны обобщены в статье [*Совершаев, Соломатин, 1998*]. Под природными факторами понимается климат, гидродинамические условия моря и геолого-геоморфо-

© А.В. Хомутов, М.О. Лейбман, 2008

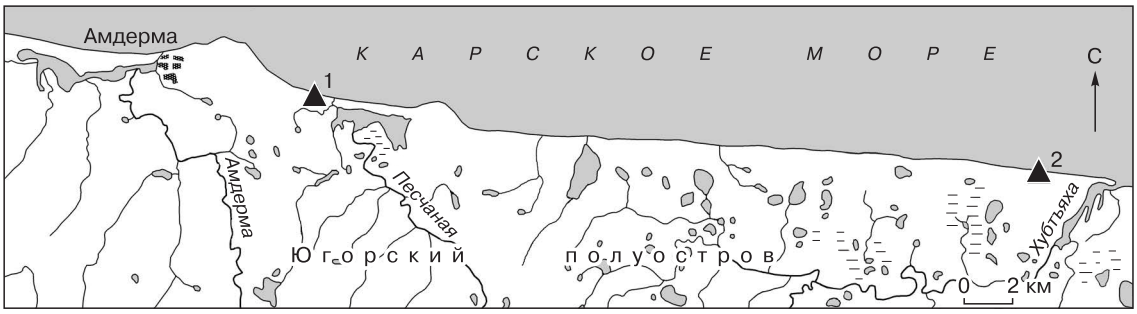

Рис. 1. Местоположение ключевых участков:

1 – Первая Песчаная, 2 – Шпиндлер.

логические условия побережья. В работах [*Васильев, 2005; Васильев и др., 2001, 2006; Кизяков и др., 2006*] к природным условиям, наиболее явно влияющим на динамику берегов, отнесены: состав слагающих уступ пород, их льдистость, наличие залежеобразующих льдов и их характеристики, главным образом мощность и положение в разрезе. В частности, выявлено влияние льдистости, литологического состава и размываемости горных пород, слагающих уступ, на развитие термоденудации [*Арэ, 1980; Васильев, 2002*]. Сформулировано, что активизация и затухание комплексной деструкции зависят не только от циклических факторов, таких как многолетние колебания температуры воздуха, но и от геолого-географических и случайных факторов [*Лейбман, Кизяков, 2007*]. К.С. Воскресенский и В.А. Совершаев [*1998*] делают вывод о том, что наличие в строении толщи суглинистых отложений существенно понижает устойчивость уступов, поскольку при оттаивании они приобретают вязкопластичную консистенцию и создают условия для широкого проявления термоденудационных и оползневых процессов. В наибольшей степени межгодовая изменчивость скоростей роста термоцирков определяется различием годовых сумм положительных температур воздуха [*Кизяков, 2005б*].

Зарубежные исследователи также активно изучают динамику термоденудационных процессов в аналогичных районах, например в Канадской Арктике [*Lantuit, Pollard, 2003; Solomon, 2003; Lantuit et al., 2005*]. Основным фактором, влияющим на отступание берегов в этих районах, признается распространение пластовых льдов.

Рассмотренные в литературе факторы, определяющие термоденудацию, недостаточно раскрывают влияние биогенного компонента. А.И. Кизяков [*2005а*] затрагивает вопрос о влиянии почвенно-растительного покрова на динамику термоцирков. На участках, лишенных растительности, термоэрозия, обусловленная таянием снега и летними дождями, более активна. Развитый почвенно-растительный покров способствует блоковому обрушению в верхних частях склонов термоцирков, зачастую обваливаются крупные блоки, ограниченные морозобойными трещинами. В той же работе влияние некоторых ландшафтных компонентов, в том числе растительного покрова, включено в состав факторов, определяющих развитие термоцирков и криогенных склоновых процессов [*Кизяков, 2005а, схема на с. 11*]. Согласно данной схеме, тип и состояние растительного покрова рассматриваются в качестве физико-географического фактора, практически напрямую влияющего на развитие термоцирков и на криогенные склоновые процессы. В работе Н.Г. Москаленко [*2006*] изучаются особенности растительных сообществ побережий п-ова Ямал, приуроченных к высоким берегам, подверженным береговым процессам, в особенности термоденудации. Н.Г. Москаленко проводит анализ видового разнообразия растительности на основе выделения типов природных геосистем побережья, различающихся по типам почв, условиям увлажнения, составу сезонноталого слоя и преобладающим экзогенным процессам.

Широкое исследование ландшафтов как индикаторов криогенных процессов было начато в 1960–1970-е годы. Е.С. Мельников с соавт. [*1974*] подчеркивает, что в условиях равнинной криолитозоны основными индикаторами современных криогенных процессов и стадий их развития являются формы микрорельефа или же внешний облик природно-территориального комплекса (ПТК) в целом. Л.И. Вейсман [*1978*] с учетом опыта других авторов [*Викторов, 1971; Мельников и др., 1974; Тыртиков, 1974*] составил схему развития основных типов ПТК (урочищ) и их отдельных компонентов под действием криогенных процессов и заболачивания для тундры и севера лесотундры Западной Сибири.

В последнее время все острее встает вопрос дистанционного изучения термоденудационных процессов по пластовым льдам на арктическом по-

бережье в связи с их активизацией под действием изменений климата, необходимостью экстраполяции точечных данных на обширные северные территории. Прогнозируемые изменения климата могут быть исследованы более эффективно путем сопряжения пространственных данных о растительности и других компонентах ландшафта с моделями процессов [*Virtanen et al., 2004*]. Поэтому индикационные свойства биогенного компонента приобретают особое значение для интерпретации динамики термоденудации. В работе предлагается методика дистанционного изучения термоденудации с использованием ландшафтной индикации, основанная на экспертной оценке роли компонентов ландшафта в отступании бровок термоденудационных уступов.

РАЙОН РАБОТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Район работ расположен в тундровой зоне, подзоне типичных тундр. Согласно классификации ландшафтов А.Г. Исаченко [*1985*], территория относится к подтипу европейско-сибирских собственно субарктических тундровых ландшафтов (группа низменных приморских аккумулятивных равнин). В западной части исследуемого района наблюдаются черты перехода к группе кряжей на дислоцированных палеозойских и протерозойских породах (северо-западная оконечность массива Пай-Хой) [*Исаченко, 1985*].

Для решения поставленной задачи были выбраны ключевые участки Шпиндлер и Первая Песчаная.

Ключевой участок Шпиндлер расположен на востоке рассматриваемого района западнее долины р. Хубтъяха в 37 км от пос. Амдерма. Ключевой участок Первая Песчаная расположен к западу от долины р. Первая Песчаная в 7 км от пос. Амдерма (см. рис. 1). На каждом ключевом участке измерялось положение отступающей бровки и скорость ее отступания для Восточного и Центрального термоцирков на Шпиндлере и для Западного и Восточного термоцирков на Первой Песчаной. Толща отложений на исследуемой территории сложена мерзлыми дисперсными песчано-глинистыми породами, вмещающими пластовый лед.

В пределах ключевых участков, а также дополнительно между ключевыми участками во время вдольберегового маршрута были выделены ландшафтные комплексы на основе классифицированного панхроматического космического снимка 2001 г. Landsat 7 ETM+ 15-метрового разрешения. Применен алгоритм ISODATA, использующийся для классификации без обучения и базирующийся на кластерном анализе. Задано 25 классов и выбрана наиболее информативная с точки зрения растительности комбинация каналов для максимально точного определения каждого класса как своеобразного ландшафтного комплекса. Ландшафтные комплексы соответствуют фациям по схеме ландшафтного районирования, созданной коллективом авторов под руководством Е.С. Мельникова [*Ландшафты..., 1983*]. Характеристики ландшафтных комплексов (фаций) включают описание характера поверхности, растительного покрова (степень покрытия и доминирующие экобиоморфы), глубины сезонного протаивания. Классификация космического снимка, проведенная с использованием алгоритма ISODATA, была успешна на 76 %, а именно, 19 из 25 выделенных классов совпали с их полевыми описаниями и только шесть в процессе полевого описания разбились на два подкласса. В результате образовался 31 класс, показанный в табл. 1 и на рис. 2, 3.

Для фаций, пересекаемых хотя бы одной из бровок (2001, 2005, 2006, 2007 гг.), измерена максимальная скорость отступания за каждый период ($v^{\max}$, м/период). При этом измерения проводились для каждого периода отступания в отдельности ($v^{\max}_{2001-2005}$, $v^{\max}_{2005-2006}$, $v^{\max}_{2006-2007}$) и для всего периода наблюдений за отступанием ($v^{\max}_{2001-2007}$) для определения межгодовой и многолетней динамики. Для этого на карте ландшафтов, полученной в результате классификации космоснимка, с нанесенными на нее бровками термоцирков за соответствующие годы, выявлялись наибольшие расстояния между линиями соседних бровок (между линией бровки 2001 г. и линией бровки 2007 г. для всего периода) в контурах каждой фации. Линии бровок за 2001 и 2007 гг. нанесены по данным GPS-съемки, за 2005 и 2006 гг. – по данным тахеометрической съемки. Затем, имея значения максимальной скорости отступания каждой фации за конкретный период (2001–2005, 2005–2006, 2006–2007 гг.), мы вычислили среднегодовую максимальную скорость отступания ($v^{\max}_{\text{ср}}$, м/год) для каждой фации, затронутой термоденудацией, по формуле

$$v^{\max}_{\text{ср}(f)} = (v^{\max}_{2001-2005(f)} + v^{\max}_{2005-2006(f)} + v^{\max}_{2006-2007(f)})/n, \quad (1)$$

где f – индекс фации в табл. 1; n – число лет между первым и последним измерениями положения бровки ($n = 6$). Например, для фации 12 среднегодовая максимальная скорость отступания

$$v^{\max}_{\text{ср}(12)} = (16{,}9 + 21{,}5 + 11{,}4)/6 = 8{,}3 \text{ м/год.}$$

При сравнении $v^{\max}_{\text{ср}}$, вычисленной по формуле (1), с $v^{\max}_{\text{ср}}$, вычисленной по формуле

$$v^{\max}_{\text{ср}(f)} = (v^{\max}_{2001-2007(f)})/n, \quad (2)$$

выясняется, что последнее значение ниже значения, полученного по формуле (1), у всех фаций в среднем на 34 %, за исключением фации 20, у которой

Таблица 1. **Характеристика ландшафтных комплексов (фаций), выделенных при классификации космического снимка, по материалам полевых описаний**

Класс	Индекс фации	Характеристика фаций (диапазон глубин сезонного протаивания, м)
1	1	Водная поверхность, глубоководье
2	2	Водная поверхность, мелководье
3	3	Оголенные поверхности, осыпи, пляжи (>1,0)
4	4	Дренированные оголенные поверхности; внутренние части термоцирков, занятые пионерными группировками растительности (>1,0)
5	5	Слабодренированные склоны с моховым покровом или оголенные (0,6–1,0)
6	6	Дренированные поверхности без выраженного микрорельефа с разреженным разнотравно-кустарниковым покровом в сочетании с осокой и мхами (0,6–1,0)
7	7	Дренированные крутые склоны с разнотравно-злаковым покровом в сочетании с мхами и лишайниками (>1,0)
8	8	Дренированные частично оголенные крутые склоны и выпуклые вершины, занятые разнотравно-ивовыми группировками (>1,0)
	9	Заболоченные пониженные плоские поверхности с осоково-сфагновым покровом (<0,6)
9	10	Заболоченные слабонаклонные кочковатые поверхности с разнотравно-осоково-моховым покровом в сочетании с ивой, морошкой и злаками (0,6–1,0)
10	11	Дренированные плоские вершины и склоны (с уклоном до 10°) с разнотравно-злаково-кустарниково-моховым и лишайниковым покровом, с пятнами-медальонами (0,6–1,0)
	12	Слабодренированные слабонаклонные поверхности без выраженного микрорельефа с мохово-осоковым покровом в сочетании с ивой (<0,6)
11	13	Заболоченные слабонаклонные поверхности с осоково-моховым покровом в сочетании с ивой и злаками (0,6–1,0)
12	14	Полигональные поверхности с преимущественно лишайниковым или моховым покровом (в зависимости от увлажнения) на полигонах и с разнотравно-осоковым или осоковым покровом в сочетании с ивой и разнотравьем между полигонами (0,6–1,0)
13	15	Поверхности крупных песчаных или каменисто-песчаных раздувов (>1,0)
	16	Поверхности скольжения с пионерными группировками растительности (>1,0)
14	17	Слабодренированные горизонтальные кочковатые поверхности с разнотравно-моховым покровом (<0,6)
15	18	Дренированные слабонаклонные поверхности, занятые разнотравно-мохово-осоковыми и разнотравно-кустарничковыми группировками в сочетании с пятнами-медальонами (>1,0)
16	19	Слабодренированные кочковатые склоны (с уклоном до 35°) с разнотравно-кустарниково-моховым покровом в сочетании с лишайниками (>1,0)
	20	Заболоченные пониженные полигональные поверхности с осоково-моховым покровом в сочетании с ивой и злаками, обладающие признаками полигональных торфяников (<0,6)
17	21	Дренированные пятнистые склоны и склоны оврагов, занятые лишайниково-моховыми и кустарниковыми группировками в сочетании с раздувами (>1,0)
	22	Слабодренированные полигональные поверхности над отвершками оврагов с осоково-моховым покровом в сочетании с морошкой (<0,6)
18	23	Дренированные волнистые крутые склоны (с уклоном до 30°) и выпуклые вершины с мохово-разнотравным покровом в сочетании с ивой и лишайниками, с пятнами-медальонами (>1,0)
	24	Слабодренированные слабонаклонные поверхности со злаково-моховым покровом в сочетании с ивой, разнотравьем и лишайниками (0,6–1,0)
19	25	Дренированные склоны (с уклоном до 15°) с разнотравно-осоково-кустарниковым покровом и лишайниками, с выходами коренных пород (0,6–1,0)
20	26	Слабодренированные слабонаклонные поверхности без выраженного микрорельефа, ложбины стока и озерные террасы с осоково-моховым покровом в сочетании с кустарниками (ивой и ерником), морошкой и злаками (0,6–1,0)
21	27	Слабодренированные наклонные плоские поверхности с разнотравно-осоковым покровом (высотой до 0,5 м) и ивой в сочетании со сфагновыми буграми с кустарничковыми группировками и пушицево-осоковыми кочками (0,6–1,0)
22	28	Слабодренированные горизонтальные кочковатые поверхности с ивово-осоково-сфагновым покровом в сочетании с разнотравьем и злаками (<0,6)
23	29	Слабодренированные слабонаклонные поверхности без выраженного микрорельефа с разнотравно-злаково-осоково-моховым покровом (высотой до 0,4 м) в сочетании с ивой (0,6–1,0)
24	30	Слабодренированные плоские поверхности с осоковым покровом (высотой до 0,5 м) в сочетании со злаками и ивой, с участками полигональных торфиников (0,6–1,0)
25	31	Слабодренированные плоские кочковатые поверхности низких озерных террас или западин с осоково-моховым покровом в сочетании с морошкой (<0,6)

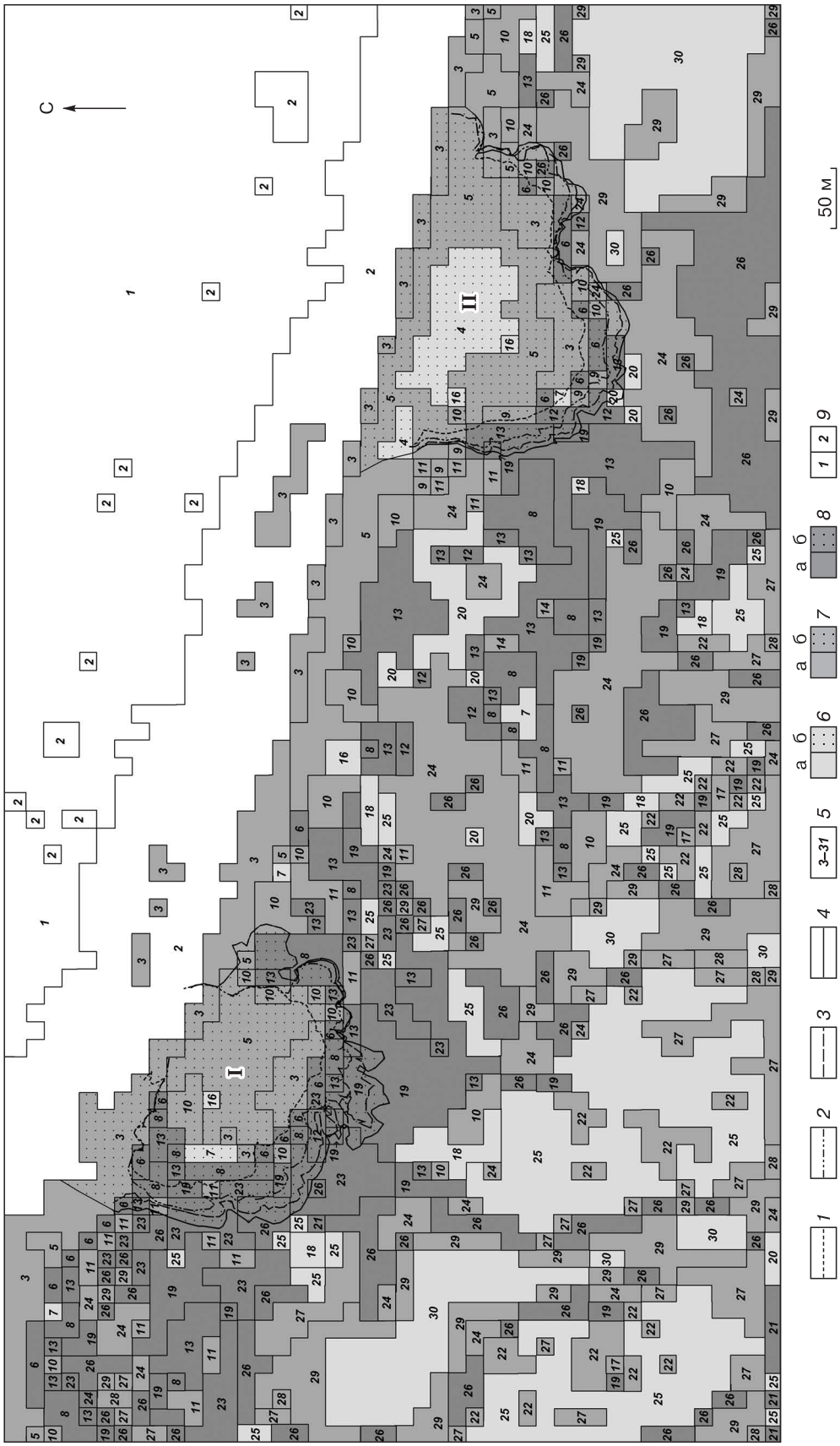

Рис. 2. Карта устойчивости ландшафтных комплексов к отступанию под действием термоденудации на ключевом участке Первая Песчаная.

Термоцирки: I – Западный, II – Восточный; линии бровки термоцирков: *1* – 2001 г., *2* – 2005 г., *3* – 2006 г., *4* – 2007 г.; *5* – индексы ландшафтных комплексов; степень устойчивости ландшафтных комплексов к отступанию (а – ненарушенных, б – нарушенных термоденудацией): *6* – устойчивые, *7* – среднеустойчивые, *8* – неустойчивые; *9* – море.

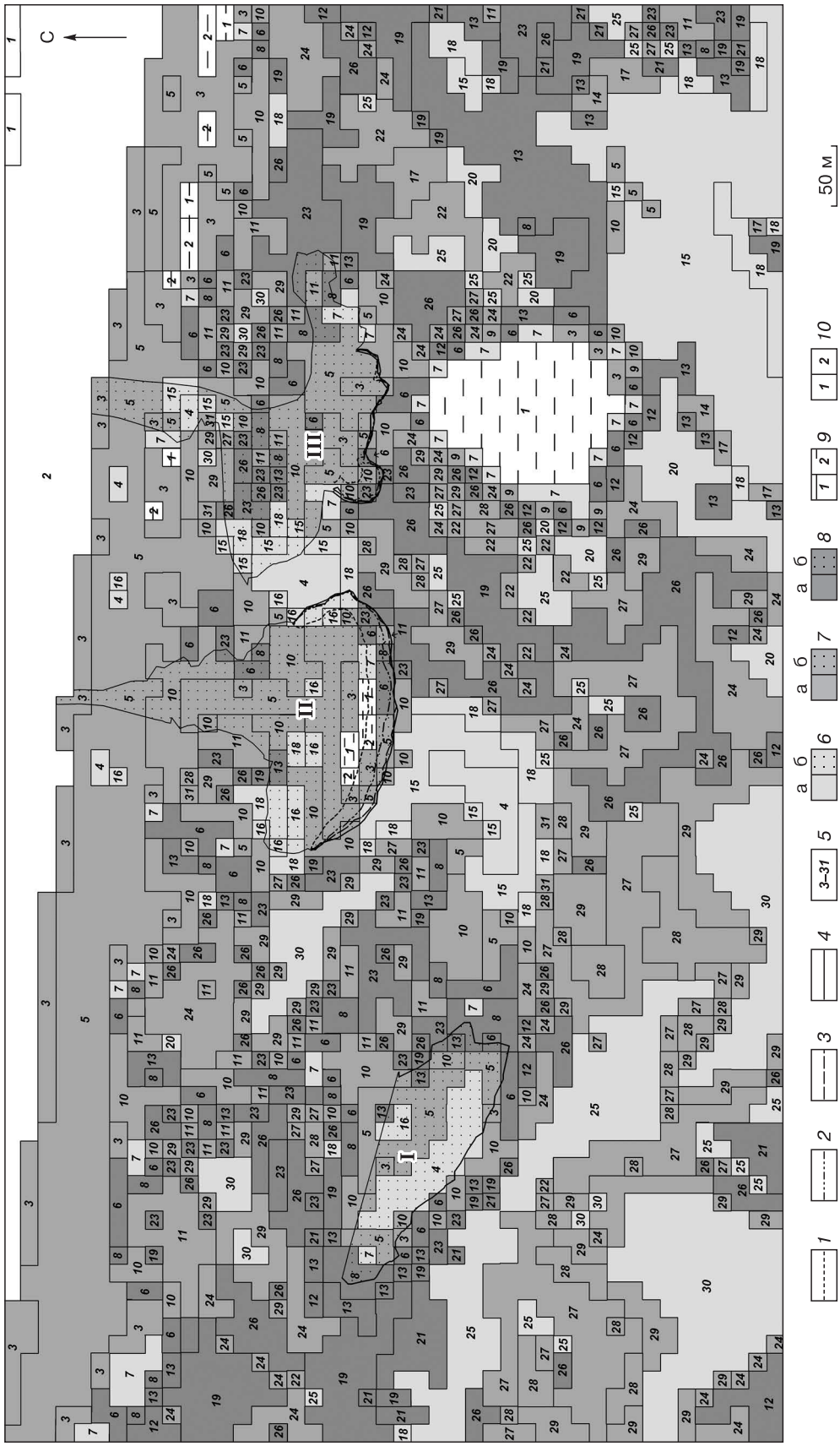

Рис. 3. Карта устойчивости ландшафтных комплексов к отступанию под действием термоденудации на ключевом участке Шпиндлер.

Термоцирки: I – Западный, II – Центральный, III – Восточный; линии бровки термоцирков: *1* – 2001 г., *2* – 2005 г., *3* – 2006 г., *4* – 2007 г.; *5* – индексы ландшафтных комплексов; степень устойчивости ландшафтных комплексов к отступанию (а – ненарушенных, б – нарушенных термоденудацией): *6* – устойчивые, *7* – среднеустойчивые, *8* – неустойчивые; *9* – водоемы суши, *10* – море.

эти значения совпали. Такое различие значений среднегодовой максимальной скорости отступания связано с тем, что в каждый отдельный период максимальное расстояние между линиями бровки, как правило, фиксируется в разных местах, а за весь период – в одном месте.

РЕЗУЛЬТАТЫ

При наложении контуров термоцирков за разные годы на классифицированный космический снимок – ландшафтную карту ключевых участков Первая Песчаная и Шпиндлер было установлено, что устойчивость ландшафтных комплексов к термоденудации наиболее явно зависит от таких факторов, как угол склона, характер увлажнения поверхности, сочетание растительных сообществ и сомкнутость растительного покрова.

В результате расчетов выделены три группы ландшафтных комплексов по степени устойчивости к отступанию термоденудационной бровки: неустойчивые, со средней устойчивостью и устойчивые. На карту устойчивости ландшафтов, составленной для обоих ключевых участков, нанесены контуры ландшафтных комплексов и разной штриховкой показаны группы устойчивости (см. рис. 2, 3).

Величина $v_{ср}^{max}$, вычисленная по формуле (1), варьирует от 1,7 до 14,6 м/год за период измерения отступания. К неустойчивым отнесены ландшафтные комплексы с $v_{ср}^{max} > 7{,}0$ м/год. Критерием выделения устойчивых ландшафтных комплексов является $v_{ср}^{max} < 4{,}0$ м/год. Соответственно, ландшафтные комплексы, где 4,0 м/год < 7,0 м/год, отнесены к группе со средней устойчивостью. Средние значения $v_{ср}^{max}$ для каждой группы вычислены как сумма среднегодовых максимальных отступаний, характерных для фаций, отнесенных к данной группе, деленная на число ландшафтов в группе, по 6–7 фаций на группу и составляют 9,2 м/год для группы неустойчивых, 5,5 м/год для группы среднеустойчивых и 2,4 м/год для группы устойчивых ландшафтных комплексов.

Ландшафтные комплексы, не затронутые к 2007 г. термоденудацией, но выделенные на космическом снимке, также разделены на три группы по степени устойчивости и нанесены на карту. Критерием разделения послужило сравнение характеристик компонентов этих ландшафтов с компонентами ландшафтов, затронутых к 2007 г. термоденудацией. Такими компонентами являются степень дренированности, уклон поверхности, ее микрорельеф, степень покрытия растительностью, доминирующая растительность.

ДИСКУССИЯ

При современных масштабах флуктуаций климата и устойчивые, и неустойчивые ландшафты сохраняют групповую принадлежность, тогда как среднеустойчивые могут перейти в группу устойчивых при похолодании или увеличении сухости либо в группу неустойчивых при потеплении или возрастании суммы летних осадков. При сопоставлении данных за рассматриваемые периоды отступания (табл. 2) обнаруживается, что в большинстве ландшафтов (рис. 4), отнесенных к устойчивым при относительном потеплении и увеличении осадков в 2005, 2006 гг., скорость отступания бровки либо почти не изменилась, либо уменьшилась. Исключение составляют фации 15 (см. рис. 4) и 20, в первом случае из-за отсутствия растительности на каменисто-песчаном субстрате, что привело к активизации эрозии, а во втором случае, видимо, из-за вытаивания ледяной жилы, что на следующий год привело к отрыву большого блока пород.

В неустойчивых ландшафтах скорость отступания при потеплении резко возросла по сравнению со средним значением за период 2001–2005 гг., за 2006–2007 гг. она несколько уменьшилась, но все равно осталась довольно высокой, за исключением фации 8, где после резкого повышения максимальная скорость отступания к 2007 г. уменьшилась

Таблица 2. **Максимальная скорость отступания бровки термоцирка (v^{max}, м/год) в пределах выделенных фаций**

Индекс фации	$v_{ср(2001–2005)}^{max}$	$v_{2005–2006}^{max}$	$v_{2006–2007}^{max}$
	м/год		
Неустойчивые			
6	6,8	10,7	10,5
8	4,9	30,1	3,8
12	4,2	21,4	11,3
13	5,0	14,0	11,3
19	5,6	45,4	19,5
23	4,5	15,6	19,1
26	4,5	16,1	14,5
Со средней устойчивостью			
3	3,4	19,1	3,0
5	3,8	16,9	3,5
9	3,6	7,2	2,8
10	5,4	11,8	5,9
11	3,4	8,7	6,7
24	5,5	12,3	8,6
29	3,5	12,1	3,6
Устойчивые			
4	2,8	1,6	3,5
7	2,4	3,1	2,5
15	0,8	7,4	4,2
16	2,1	1,2	0,2
18	3,4	2,5	1,3
20	0	2,6	11,3

даже по сравнению с 2001–2005 гг. Это можно объяснить тем, что в 2005–2006 гг. в пределах одного из контуров фации 8 в Западном термоцирке Первой Песчаной обвалилась наиболее крутая часть склона (см. рис. 4, 8б), под которым в августе 2005 г. наблюдалась “пещера” со вскрытым пластом льда (см. рис. 4, 8а). Максимальная скорость отступания у фации 6 к 2007 г. стабилизировалась на отметке чуть более 10 м/год из-за разреженного растительного покрова, в котором доминируют стелющиеся кустарники, не препятствующие оползанию блоков породы, образованных при морозобойном растрескивании.

Среднеустойчивые ландшафты, характеризующиеся достаточно низкими средними значениями максимального отступания в период 2001–2005 гг. (от 3,4 до 5,4 м/год), при потеплении в период 2005–2006 гг. стали отступать намного быстрее (от 7,2 до 19,1 м/год), а при последующем относительном похолодании (2006–2007 гг.) максимальная скорость отступания в этих ландшафтах снизилась до значений, характерных для периода до потепления (2,8–6,7 м/год). Таким образом, ландшафты, в которых под песчаными отложениями вскрываются льдистые породы, при потеплении и увеличении суммы летних осадков переходят в группу неус-

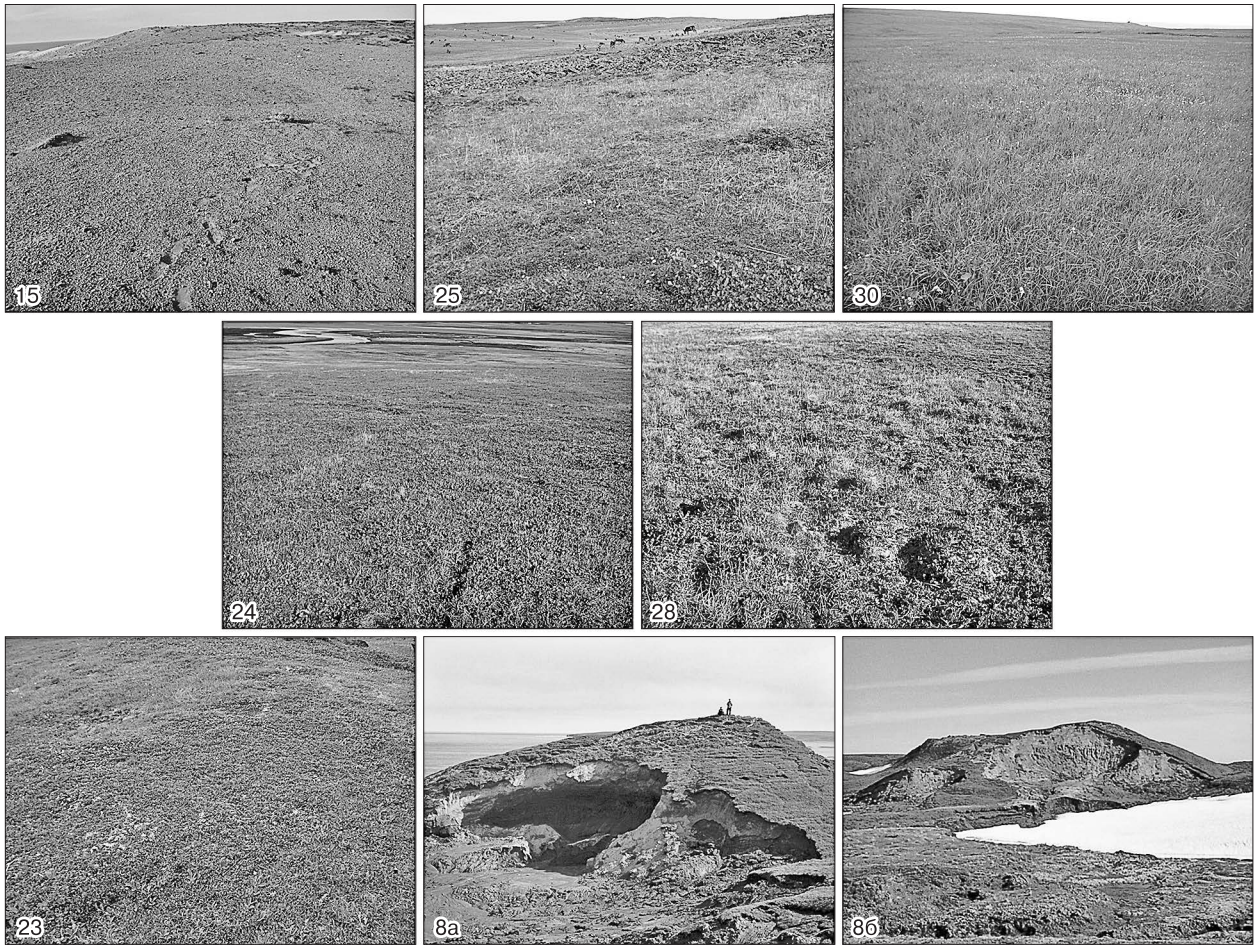

Рис. 4. Наиболее распространенные ландшафтные комплексы (индексы фаций см. в табл. 1–3).

Устойчивые: 15 – поверхности крупных песчаных или каменисто-песчаных раздувов, 25 – дренированные склоны с уклоном до 15°, с разнотравно-осоково-кустарниковым покровом и лишайниками, с выходами коренных пород, 30 – слабодренированные плоские поверхности с осоковым покровом высотой до 0,5 м в сочетании со злаками и ивой, с участками полигональных торфяников. Со средней устойчивостью: 24 – слабодренированные слабонаклонные поверхности со злаково-моховым покровом в сочетании с ивой, разнотравьем и лишайниками, 28 – слабодренированные горизонтальные кочковатые поверхности с ивово-осоково-сфагновым покровом в сочетании с разнотравьем и злаками. Неустойчивые: 23 – дренированные волнистые крутые склоны с уклоном до 30° и выпуклые вершины с мохово-разнотравным покровом в сочетании с ивой и лишайниками, с пятнами-медальонами, 8а (фото 2005 г.), 8б (фото 2007 г.) – дренированные частично оголенные крутые склоны и выпуклые вершины, занятые разнотравно-ивовыми группировками.

тойчивых, так как отступают быстрее. Особенно высокими скоростями отступания бровки в этом случае будут характеризоваться ландшафты с большим уклоном поверхности. При похолодании или сокращении суммы летних осадков почти во всех ландшафтах замедляется отступание бровки, так как в первом случае уменьшается максимальная глубина протаивания, а во втором улучшается дренированность.

Буферным фактором при флуктуациях климата выступает мохово-лишайниковый покров, оказывающий теплоизолирующее воздействие и в значительной степени уменьшающий амплитуду колебаний температуры на поверхности. Теплоизолирующее влияние мохового яруса возрастает с увеличением его мощности [*Осадчая, 1987*]. Однако, согласно [*Лейбман, 2001*], увеличение мощности мохового горизонта в сочетании с кустарниками на вогнутых склонах приводит к незначительному повышению глубины оттаивания, т. е. моховой покров при благоприятных условиях снегозадержания препятствует выхолаживанию при похолодании.

Основные ландшафтные факторы, влияющие на скорость отступания, приведены в табл. 3.

Крутизна склонов оказывает свое влияние через гравитацию, благоприятствуя сносу материала со склона. Сложный микрорельеф, формирующийся под воздействием морозобойных трещин и трещин усыхания, обеспечивает отрыв целых блоков пород сезонноталого слоя. Дренированность действует по-разному в сочетании с другими факторами. Сильноувлажненные поверхности, как правило, имеют наименьший уклон, т. е. гравитация действует в наименьшей степени. Слабая дренированность встречается и на поверхностях без выраженного микрорельефа, и на кочковатых, бугорковатых поверхностях. Соответственно, этот фактор либо способствует отступанию, либо нейтрален по отношению к нему. Сухие поверхности встречаются и на плоских песчаных террасах, и на крутых осыпных склонах. В первом случае этот фактор слабо влияет на отступание, а во втором ему способствует. На дренированных склонах дернина рыхлая и иссушенная, развиты трещины усыхания. Травяная растительность с неглубокими корнями, часто преобладающая на таких склонах, не способна удержать верхний слой песчаной породы при приближении к термоденудационной бровке. Отступание происходит за счет постепенного отделения неболь-

Таблица 3. **Устойчивость ландшафтов к отступанию бровки термоцирка под действием термоденудации**

Группа ($v_{ср}^{max}$, м/год)	Индекс фации	$v_{ср}^{max}$, м/год	Диапазон глубины протаивания, м	Ландшафтные факторы				
				1	2	3	4	5
Неустойчивые (9,2)	19	14,6	>1,0	Кр	Тр	ДВ	З	Мо, Ку, Ра
	8	8,9	>1,0	Кр	Тр	Д	ОЗ	Ку, Ра
	23	8,8	>1,0	Кр	Тр, ПМ	Д	З	Ра, Мо
	12	8,3	<0,6	По	Бм	ДВ	З	Мо, Ос
	26	8,1	0,6–1,0	По	Бм	ДВ	З	Мо, Ос
	6	8,0	0,6–1,0	Го	Бм	Д	ОЗ	Ку, Ра
	13	7,6	0,6–1,0	По	Тр, Ко	В	З	Мо, Ос
Со средней устойчивостью (5,5)	10	6,6	0,6–1,0	По	Ко	В	З	Ос, Мо, Ра
	24	6,3	0,6–1,0	По	Бм	ДВ	З	Мо, Зл
	3	5,95	>1,0	Кр	Бм	Д	О	–
	5	5,9	0,6–1,0	Кр	Тр	ДВ	ОЗ	Мо
	29	5,0	0,6–1,0	По	Бм	ДВ	З	Мо, Ос
	11	4,8	0,6–1,0	По	ПМ	Д	З	Мо, Ку, Зл
	9	4,1	<0,6	Го	Ко	В	З	Мо
Устойчивые (2,4)	18	2,9	>1,0	По	Тр, ПМ	Д	З	Ос, Ку, Мо
	4	2,7	>1,0	Го	Бм	Д	ОЗ	Зл
	7	2,6	>1,0	Кр	Бм	Д	З	Зл, Ра
	15	2,4	>1,0	Го	Бм	Д	О	–
	20	2,3	<0,6	Го	Тр	В	З	Ос, Мо
	16	1,7	>1,0	По	Бм	Д	ОЗ	Зл

Примечание. 1 – уклон поверхности: Кр – крутые склоны, По – пологие склоны, Го – горизонтальные поверхности; 2 – характер поверхности: Бм – без выраженного микрорельефа, Тр – с трещинами (бугорковатая и/или полигональная), Ко – кочковатая, ПМ – с пятнами-медальонами; 3 – степень дренированности: Д – дренированные, ДВ – слабодренированные, В – влажные; 4 – степень покрытия растительностью: О – оголенная поверхность, ОЗ – частично лишенная растительности, З – заросшая; 5 – доминирующие экобиоморфы: Ку – кустарники и кустарнички, Ра – разнотравье, Зл – злаки, Мо – мхи, Ос – осоки.

ших фрагментов дернины, ограниченных трещинами усыхания. Обнаженная песчаная порода либо осыпается под действием гравитации и дефляции, либо размывается дождевыми водами. Наиболее заросшие поверхности, особенно с преобладанием мхов, в значительной мере подвержены отступанию бровки в связи с развитием морозобойного растрескивания и отделением при этом крупных блоков, обрушающихся целиком.

Поскольку преобладающий процесс – термоденудация, то чем глубже сезонноталый слой, тем вероятнее вскрытие залежи пластового льда. Однако глубина протаивания более 1 м преобладает и в категории неустойчивых, и в категории устойчивых ландшафтов, но в первом случае это крутые склоны, а во втором – пологие и горизонтальные поверхности. Доминирование таких экобиоморфов, как кустарники и мхи, приводит к увеличению скорости отступания. Кустарники, в основном стелющиеся, имеют довольно прочные и разветвленные надземную и подземную части, которые способны удерживать до определенного момента блоки породы, отделенные в результате морозобойного растрескивания. При достижении критической массы блока, отделенного морозобойной трещиной, эти блоки обваливаются целиком. В отличие от других экобиоморфов мхи имеют ослабленные связи между отдельными растениями и поэтому не препятствуют непрерывному отступанию бровки под влиянием термоденудации. При доминировании злаковой растительности отступание замедленно, так как граминоиды образуют более густой покров. Их мочковатая корневая система имеет большое количество придаточных корней, которые, однако, не могут долго удерживать блок породы, отделенный морозобойной трещиной, от обрушения так, как корневая система кустарников.

Анализ данных табл. 3 показывает, что неустойчивые фации характеризуются, как правило, более слабой дренированностью, чем устойчивые. Они часто приурочены к более крутым бугорковатым склонам с пятнами-медальонами, с хорошо развитым растительным покровом, в котором доминируют кустарники и мхи. В то же время ландшафтные комплексы, относящиеся к категории устойчивых, в целом лучше дренированы. К этой категории относятся горизонтальные или пологонаклонные плоские поверхности, часто оголенные или с разреженной растительностью, с доминирующими злаками. Ландшафтные комплексы со средней степенью устойчивости характеризуются разнообразием параметров. Некоторые из этих параметров при потеплении обеспечивают резкое увеличение скорости отступания, а другие при похолодании способствуют такому же резкому ее снижению.

Для того чтобы выяснить роль каждого фактора, влияющего на отступание, была проведена экспертная балльная оценка степени их влияния. Эта оценка основывается на встречаемости той или иной характеристики у ландшафтных комплексов с известной степенью устойчивости. Каждый фактор оценивался в баллах в диапазоне от 1 до 3. Наибольшее количество баллов соответствует значению фактора, в наибольшей степени способствующего отступанию, и наоборот. Например, большая крутизна склона, которая преобладает в неустойчивых ландшафтах, соответствует 3 баллам, горизонтальным поверхностям отвечает 1 балл. Пологие склоны оцениваются в 2 балла. Водные поверхности и пляжи в балльную оценку не включены, поскольку не подвержены термоденудации.

Баллы были просуммированы и осреднены для каждой из групп устойчивости к отступанию (табл. 4). В табл. 4 ландшафтные комплексы со значительной, согласно полевым измерениям, скоростью отступания (неустойчивые) имеют самый высокий средний балл по всем факторам, что подтверждает применимость экспертной оценки по предложенной методике. Исключение составляет степень дренированности для среднеустойчивых ландшафтов, видимо, из-за того, что в этой группе объединились влажные или слабодренированные фации, в которых действие увлажнения как фактора, влияющего на отступание, компенсировано отсутствием растрескивания, а также доминированием травянистой растительности на пологих склонах либо полным отсутствием уклона (см. табл. 3).

Рассчитана разность средних значений всех ландшафтных факторов между категориями неустойчивых и устойчивых фаций. Максимальная разница 1,2 (см. табл. 4) относится к доминирующим растительным формациям. Это означает, что в принятой системе оценки этот фактор наиболее весомый при определении степени устойчивости к отступанию.

Таблица 4. **Устойчивость ландшафтов к отступанию бровки термоцирка под действием термоденудации**

Группа фаций	Средний балл для групп	Средний балл для ландшафтных факторов*				
		1	2	3	4	5
Неустойчивые	11,0	2,3	1,9	1,7	2,4	2,4
Со средней устойчивостью	9,6	2,1	1,7	2,0	2,3	1,9
Устойчивые	7,5	1,7	1,5	1,3	1,8	1,2
Разность средних баллов между неустойчивыми и устойчивыми	3,5	0,6	0,4	0,4	0,6	1,2

* 1–5 – см. примечание к табл. 3.

Однако при рассмотрении каждой фации в отдельности с использованием балльной оценки выявляется следующее. Если какой-либо фактор имеет среднее из возможного количество баллов в сочетании с другим фактором, имеющим такое же или меньшее количество баллов, он может влиять на степень устойчивости к отступанию. Поэтому ландшафты с такими сочетаниями факторов могут относиться к неустойчивым, даже если по сумме баллов они соответствуют среднеустойчивым. Например, каждый неустойчивый ландшафтный комплекс 12 и 26 (см. табл. 3) имеет сумму баллов ландшафтных факторов равную 10, что ближе к среднему значению для группы среднеустойчивых (см. табл. 4). Это объясняется тем, что у этих ландшафтов наиболее весомые факторы (крутизна склона и доминирующая растительность), влияющие на отступание, имеют среднее значение 2 балла.

ВЫВОДЫ

Предложена методика оценки влияния ландшафтных компонентов на отступание бровки термоцирков под действием термоденудации. Методика заключается в совмещении данных по скорости отступания бровки с картографической основой, несущей информацию о ландшафтной структуре территории, с последующей балльной оценкой влияния компонентов ландшафта на скорость отступания.

При использовании предложенной методики выявлено следующее.

• Наиболее значимым фактором и одновременно индикатором устойчивости к термоденудации является доминирующая растительная формация. Доминирование кустарниково-моховой растительности является индикатором неустойчивости ландшафтов к максимальному береговому отступанию, а преобладание злаковой растительности указывает на незначительное максимальное отступание.

• Геоморфологические факторы менее значимы. Наиболее весомым из них является уклон поверхности, видимо, из-за действия гравитации, усиливающей отступание крутых склонов. Такие элементы поверхности, как бугорки и пятна-медальоны, повышают неустойчивость ландшафтов к отступанию, особенно в сочетании с большим уклоном поверхности, поскольку образуются за счет растрескивания и пучения в сезонноталом слое, способствующих ослаблению прочности вблизи бровки.

• Ландшафтные факторы, даже если каждый из них имеет средний балл, в сочетании друг с другом могут приводить к высоким значениям максимального отступания в пределах некоторых ландшафтных комплексов и к отнесению таких ландшафтов к категории неустойчивых.

Предложенная методика оценки влияния ландшафтных факторов на скорость термоденудации может быть применена и в других районах развития этого процесса, но с учетом специфики местных условий, немаловажным из которых является ландшафтная структура.

В полевых работах принимали участие сотрудники института ВНИИОкеангеология. Авторы выражают благодарность Б.Г. Ванштейну, Ю.Г. Фирсову и Г.А. Черкашеву за помощь и поддержку.

Литература

Арэ Ф.Э. Термоабразия морских берегов. М., Наука, 1980, 159 с.

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”. Архангельск, 2002, т. 1, с. 493–497.

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

Васильев А.А., Покровский С.И., Шур Ю.Л. Динамика термоабразионных берегов Западного Ямала // Криосфера Земли, 2001, т. V, № 1, с. 44–52.

Васильев А.А., Стрелецкая И.Д., Черкашев Г.А., Ванштейн Б.Г. Динамика берегов Карского моря // Криосфера Земли, 2006, т. X, № 2, с. 56–67.

Вейсман Л.И. Особенности ландшафтно-индикационных исследований криогенных процессов // Криогенные процессы. М., Наука, 1978, с. 19–32.

Викторов С.В. Индикация природных процессов // Теоретические вопросы фитоиндикации. Л., Наука, 1971, с. 156–161.

Воскресенский К.С., Совершаев В.А. Роль экзогенных процессов в динамике арктических побережий // Динамика арктических побережий России. М., Изд-во Моск. ун-та, 1998, с. 35–48.

Исаченко А.Г. Ландшафты СССР. Л., Изд-во Ленингр. ун-та, 1985, 320 с.

Кизяков А.И. Динамика термоденудационных процессов в районах распространения залежей пластовых льдов: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М., 2005а, 26 с.

Кизяков А.И. Динамика термоденудационных процессов на побережье Югорского полуострова // Криосфера Земли, 2005б, т. IX, № 1, с. 63–67.

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.

Ландшафты криолитозоны Западно-Сибирской газоносной провинции / Отв. ред. Е.С. Мельников. Новосибирск, Наука, 1983, 165 с.

Лейбман М.О. Динамика слоя сезонного оттаивания пород и методика измерения его глубины в различных ландшафтах Центрального Ямала // Криосфера Земли, 2001, т. V, № 3, с. 17–24.

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

Мельников Е.С., Вейсман Л.И., Крицук Л.Н. и др. Ландшафтные индикаторы инженерно-геокриологических условий севера Западной Сибири и их дешифровочные признаки. М., Недра, 1974, 132 с.

Москаленко Н.Г. Растительные сообщества побережий Ямала как объект для изучения биоразнообразия и создания базы данных // Криосфера Земли, 2006, т. X, № 2, с. 90–95.

Осадчая Г.Г. Влияние снежного и растительного покровов на криогенные процессы // Криогенные процессы / Под ред. А.И. Попова. М., Изд-во Моск. ун-та, 1987, с. 170–182.

Совершаев В.А., Соломатин В.И. Проблемы исследований побережий и шельфа арктических морей // Динамика арктических побережий России. М., Изд-во Моск. ун-та, 1998, с. 7–11.

Тыртиков А.П. Динамика растительного покрова и развитие вечной мерзлоты в Западной Сибири. М., Изд-во Моск. ун-та, 1974, 198 с.

Lantuit H., Couture N., Pollard W.H. et al. Short-term evolution of coastal polycyclic retrogressive thaw slumps on Herschel Island, Yukon Territory // Rep. Polar and Marine Res., 2005, No. 506, p. 72–75.

Lantuit H., Pollard W.H. Remotely sensed evidence of enhanced erosion during the twentieth century on Herschel Island, Yukon Territory // Rep. Polar and Marine Res., 2003, No. 443, p. 54–59.

Solomon S.M. A new shoreline change database for the Mackenzie-Beaufort region, NWT, Canada // Rep. Polar and Marine Res., 2003, No. 443, p. 108–109.

Virtanen T., Mikkola K., Nikula A. Satellite image based vegetation classification of a large area using limited ground reference data: a case study in the Usa Basin, north-east European Russia // Polar Res., 2004, vol. 23(1), p. 51–66.

Поступила в редакцию
7 мая 2008 г.