

ГЕОСИСТЕМЫ БЕРЕГОВ КАРСКОГО МОРЯ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЯЮЩЕГОСЯ КЛИМАТА

Б. Г. Ванштейн

Всероссийский научно-исследовательский институт геологии и минеральных ресурсов Мирового океана им. академика И. С. Грамберга (Санкт Петербург, Российская Федерация)

И. Д. Стрелецкая

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова (Москва, Российская Федерация)

А. А. Письменюк

Всероссийский научно-исследовательский институт геологии и минеральных ресурсов Мирового океана им. академика И. С. Грамберга (Санкт Петербург, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 14 мая 2020 г.

Приведены результаты геохимических исследований подземных льдов и вмещающих отложений на участках деградирующих берегов Карского моря. Выявлены два морфологических типа разрушения береговой зоны: линейное и объемное отступление. Оценены скорости и объемы поступления терригенного материала, а также отдельных химических элементов и их соединений в акватории, высвобождаемых при термоденудации и термоабразии берегов. Результаты исследований позволили создать геохимическую модель изменений в геосистемах прибрежно-шельфовой зоны в условиях современного потепления климата в Арктике.

Ключевые слова: *побережье Карского моря, мерзлые породы, береговые процессы, метан, органический углерод, геохимия подземных льдов и отложений.*

Введение

В контексте современных климатических изменений криолитозона является наиболее уязвимым компонентом окружающей среды. Особенно быстрые и ощутимые изменения происходят в береговой зоне арктических морей. Основные деструктивные процессы в береговой зоне — термоабразия и термоденудация. Они наиболее активно проявлены на участках берегов, сложенных сильнольдистыми дисперсными многолетнемерзлыми породами (ММП), в которых присутствуют полигонально-жильные (ПЖЛ) и пластовые (ПЛ) льды. В процессе термоденудации и термоабразии идет дополнительная аккумуляция материала в устьях рек, на лайдах, осушках, пляжах, мелководье, где происходит накопление минеральных частиц, органики, солей, их сезонное и многолетнее промерзание. В настоящее время накоплен значительный объем информации, который позволил оценить среднюю скорость раз-

рушения морских берегов арктического побережья (0,5 м/год), а также объемы выноса терригенного материала [1]. Однако скорость отступления берегов очень сильно варьирует в зависимости от локальных условий [2—4]. Геохимические аспекты термоденудации и термоабразии арктических берегов изучены недостаточно, в основном базируются на анализе вариаций отдельных химических и минеральных компонентов в подземных льдах и, как правило, используются для палеорекострукций и установления условий промерзания отложений. В то же время исследования неконсервативных химических элементов позволяют выделить типоморфные ассоциации, которые характеризуют тот или иной тип природных вод. Сравнение выделенных типоморфных ассоциаций природных вод и подземных льдов позволяет решать вопросы генезиса последних.

Наиболее полно освещены вопросы, касающиеся выноса и трансформации органического углерода ($C_{орг}$) на акваториях северных морей [5—8]. В связи с потеплением климата, увеличением средне-

годовых температур и деградации ММП большое внимание стало уделяться проблеме эмиссии газов, в основном метана, который при разрушении берегов и оттаивании отложений поступает в атмосферу [9—11]. Влияние эмиссии метана при деградации мерзлых пород неоднозначно. Существует мнение [12], что дополнительное поступление метана в атмосферу способно существенно повлиять на арктический климат. Другая точка зрения [13] опровергает серьезные изменения в атмосфере за счет деградации ММП. Объем выноса в атмосферу при таянии подземного льда малых примесных составляющих газов галоген-углеводородных соединений, в частности природных фреонов, обладающих разрушающим действием на озоновый слой, практически не изучен. Однако последствия климатических изменений, такие как повышение уровня моря, увеличение безледного периода в Арктике, ведут к увеличению скоростей отступления берегов и росту объемов поступления отложений в акватории. Вместе с этим материалом увеличивается поступление рассеянного органического вещества, окклюзированных во льдах и породе газов и низковалентных ионов металлов (преимущественно двухвалентного железа). В связи с этим очевидна необходимость определения объемов поступления вышеперечисленных компонентов при криогенных процессах, приводящих к деградации береговых геосистем, а также мониторинга в прибрежно-шельфовой зоне.

Криогенные процессы в береговой зоне арктических морей

Побережья арктических морей России от западной границы Баренцева моря до восточной границы Чукотского моря простираются на 22 600 км, а вместе с островами береговая линия достигает 36 136 км [14]. При этом больше половины всей протяженности берегов сложено льдистыми дисперсными породами, в которых широко распространены подземные льды. В связи с этим на берега постоянно оказывается термомеханическое воздействие, особенно с учетом современных климатических изменений. Наиболее распространенными криогенными процессами в береговой зоне являются термоабразия и термоденудация. Термоабразией принято называть процесс разрушения берега и подводного берегового склона, сложенного ММП или льдом, под тепловым и механическим воздействием водных масс. Надводная часть береговой зоны разрушается под действием воздуха, солнечной радиации и денудационных процессов. Этот процесс принято называть термоденудацией. В береговой зоне термоденудация включает протаивание многолетнемерзлых пород и связанные с этим склоновые процессы — обвально-осыпные, солифлюкцию и т. д. [15]. На побережье криолитозоны процессы термоденудации и термоабразии встречаются повсеместно. На скорость отступления берегов сильно влияют особенности криогенного строения, в частности со-

став и льдистость отложений, наличие подземных льдов: текстурных, ПЖЛ, ПЛ. Обычно термоабразия происходит линейно, а измерения ее скорости проводятся по профилям, перпендикулярным наблюдаемой береговой линии (однонаправленное отступление). На участках распространения ПЛ и ПЖЛ не наблюдается отступление клифа параллельно самому себе, а под действием термоденудационных процессов образуется термоцирк, который в морфологическом плане развивается, как полузамкнутый залив, по мере того как исчерпывается ледяная залежь. Образование термоцирков предполагает двунаправленное отступление, т. е. для оценки его скорости измеряется площадь отступления бровки склона или, в случае образования сложной формы в виде котлована, трехнаправленного отступления, что позволяет рассчитать объем. Этот объем выносимого материала складывается из талых отложений, воды и газа, что, естественно, скажется на балансе наносов органического углерода и других компонентов арктического бассейна. При этом исследования термоабразии на западном побережье Ямала показали, что величина поступления твердого материала в Карское море сопоставима с твердым стоком рек этого бассейна или даже превышает его [16].

Методы исследования

Исследования проводились в два этапа. Комплекс полевых исследований включал детальное описание разрезов четвертичных отложений и их криогенного строения на исследуемых участках, а также отбор проб подземных льдов и вмещающих отложений.

Исследования второго этапа осуществлялись в химико-спектральной лаборатории ФГБУ «ВНИИ-Океангеологии». Определялись формы нахождения Fe (III) в воде, включая мономерные, димерные и полимерные комплексы, которые были исследованы методом спектрофотометрии [17—19] на спектрофотометре СФ-46 по специально разработанной методике. Для каждого образца давались спектры поглощения, соотношения простейших и полимерных форм гидролиза Fe (III), которые в дальнейшем сравнивались со спектрами различных типов природных вод (морской, речной, озерной, снегом). Путем мокрого химического сжигания по методу Кюпа определено содержание $C_{орг}$ в отложениях. Состав газовой компоненты в отложениях и льдах, окклюзированной преимущественно в пузырчатых льдах, определялся на газовом хроматографе SHIMADZU GC 2014.

Объекты исследования

Изучение содержания органического углерода, химического состава железа, в частности трехвалентного и двухвалентного, а также газовой составляющей в подземных льдах и мерзлых отложениях проводилось с участием авторов на трех участках побережья Карского моря: в районе урочища Шпиндлера, полярной станции Марре-Сале



Рис. 1. Схема расположения участков исследования
Fig. 1. The layout of the study sites

и полярной станции Сопочная Карга (рис. 1). Все участки находятся в зоне распространения многолетнемерзлых пород и в настоящее время активно разрушаются.

Урочище Шпиндлера. В западной части Карского моря на побережье Югорского полуострова был исследован термоцирк высотой до 45 м над уровнем моря, в стенке которого вскрываются мощные залежи пластового льда. Геологические и геокриологические особенности обнажения были опубликованы ранее (рис. 2) [20—22]. Берег сложен морскими и ледниково-морскими глинистыми отложениями с прослойками песков [8].

В стенке термоцирка вскрываются два яруса ПЛ разной мощности. Мало мощные ледяные жилы (до 2 м) встречаются в верхней части обнажения, представленного песчаными отложениями с прослойками оторфованного суглинка. Мощность верхнего яруса ПЛ достигает 12—15 м при протяженности 300—500 м, нижнего — 3—5 м при протяженности более 1 км. ПЛ верхнего яруса мощностью до 15 м представлен сводчатой структурой с переслаиванием пузырчатого, прозрачного и полосчатого льда. Нижний контакт представляет собой постепенный переход от льда с включениями гравия к сильнольдыстым

песчано-гравийным отложениям с постепенно снижающейся с глубиной льдыстостью. Верхний ярус пластовых льдов перекрыт морскими глинистыми осадками. Нижний пласт льда — видимой мощности до 3 м. Вмещающие отложения характеризуются постепенным переходом от гравийно-песчаных мало льдыстых к сильнольдыстым отложениям, ледогрунту, льду с включениями гравия и наконец к чистому стекловидному льду. Лед перекрыт толщей переслаивающихся песков и суглинков мощностью до 15 м. ПЛ местами сильно деформированы [21]. Содержание $C_{орг}$ в глинах составляет в среднем 0,7% [8].

В 2000 г. были проведены полевые работы, позволившие провести топографическую съемку береговой зоны. Сопоставление полученных результатов с аэрофотоснимками 1947 г. (масштаба 1:50 000) позволили определить основные параметры отступления береговой зоны в районе урочища Шпиндлера. Результаты площадных и объемных измерений приведены в табл. 1, из которой видно, что объемы ежегодной потери прибрежной зоны

вследствие термоабразионных процессов довольно внушительны и должны учитываться в общем балансе поступления терригенного материала на арктический шельф.

При анализе электронных спектров расплавов ПЛ урочища Шпиндлера было выявлено, что Fe (III) в подземных льдах находится преимущественно в составе полиядерных комплексов. Простейшие продукты гидролиза Fe (III), присутствующие в расплавах подземного льда, образовались вследствие окисления растворенного в воде Fe (II). Содержание Fe (II) и Fe (III) неодинаковы для разных ярусов ПЛ. Так, наибольшее значение Fe (II) характерно для льда с включениями гравия и полосчатого льда (116,1 и 84,5 мг/л соответственно). Лед с включениями гравия и полосчатый по сравнению с пузырчатым и стекловидным ПЛ отличаются наиболее высокими содержаниями полиядерных комплексов Fe (III). Присутствие значительных примесей Fe^{3+} и Fe^{2+} , низкий окислительный потенциал, идентичность структур корреляционных связей между примесными элементами в расплаве льда с включениями гравия, полосчатого льда и вмещающих терригенных отложениях [23] свидетельствуют о сегрегационном механизме образования пластового льда след-

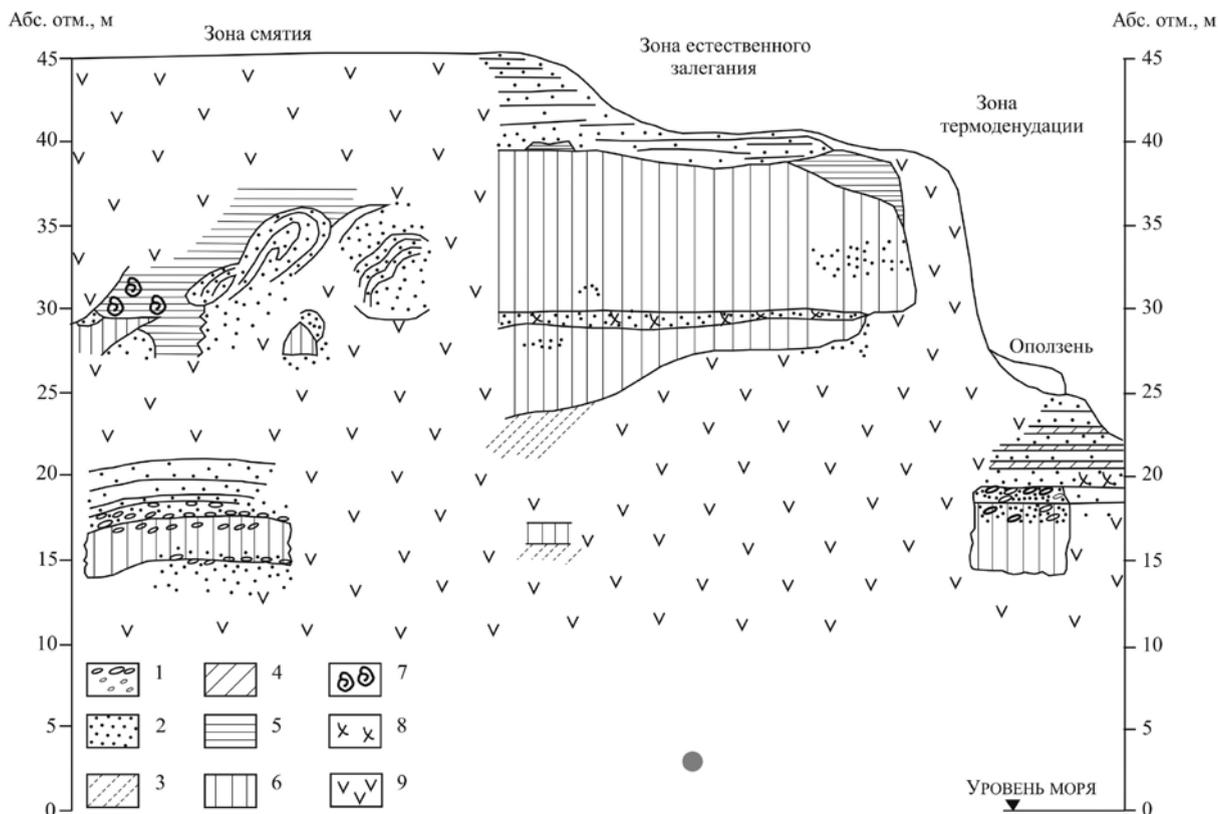


Рис. 2. Схематический разрез четвертичных отложений в районе урочища Шпиндлера (по [21] с дополнениями авторов).
 Условные обозначения: 1 – гравий, галька; 2 – песок; 3 – супесь; 4 – суглинок; 5 – глины; 6 – пластовые льды; 7 – ракушки; 8 – растительные остатки; 9 – осыпь. Абс. отм. – абсолютные отметки высоты поверхности побережья
 Fig. 2. Schematic section of the Quaternary deposits in the Spindler area (according to [21], with the additions of the authors).
 Legend: 1 – gravel, pebbles; 2 – sand; 3 – sandy loam; 4 – loam; 5 – clay; 6 – tabular massive ground ice; 7 – mussels; 8 – plant remains; 9 – talus. Абс. отм. – absolute elevations of the coast surface

Таблица 1. Параметры отступления термоцирков в прибрежной зоне в районе урочища Шпиндлера (1947—2000 гг.)

Анализируемые термоцирки	Длина отступления (минимальная—максимальная/средняя), м	Площадь отступления, м ²	Объемы отступления, м ³
Западный	0—50/19	13 975	175 000
Центральный	0—110/41	15 375	210 000
Восточный	20—180/88	33 900	255 000
Эмбриональный	40—195/78,5	27 700	138 500
Сумма		90 950	778 500
Нормализация на 1 м берега		96	819

ствие промерзания влажных грунтов, где подземная вода находилась в равновесии с терригенными отложениями. В процессе метаморфизма ранних генераций ПЛ, приводящего к формированию более поздних его типов (стекловидного, пузырчатого) при более высоком окислительном потенциале, проис-

ходит вынос содержащегося в нем железа. Осаждение последнего в составе гидроксидов Fe (III) и сидерита происходит преимущественно в терригенных отложениях над пластами подземного льда.

Результаты хроматографического анализа газовых включений верхнего пластового льда показали,

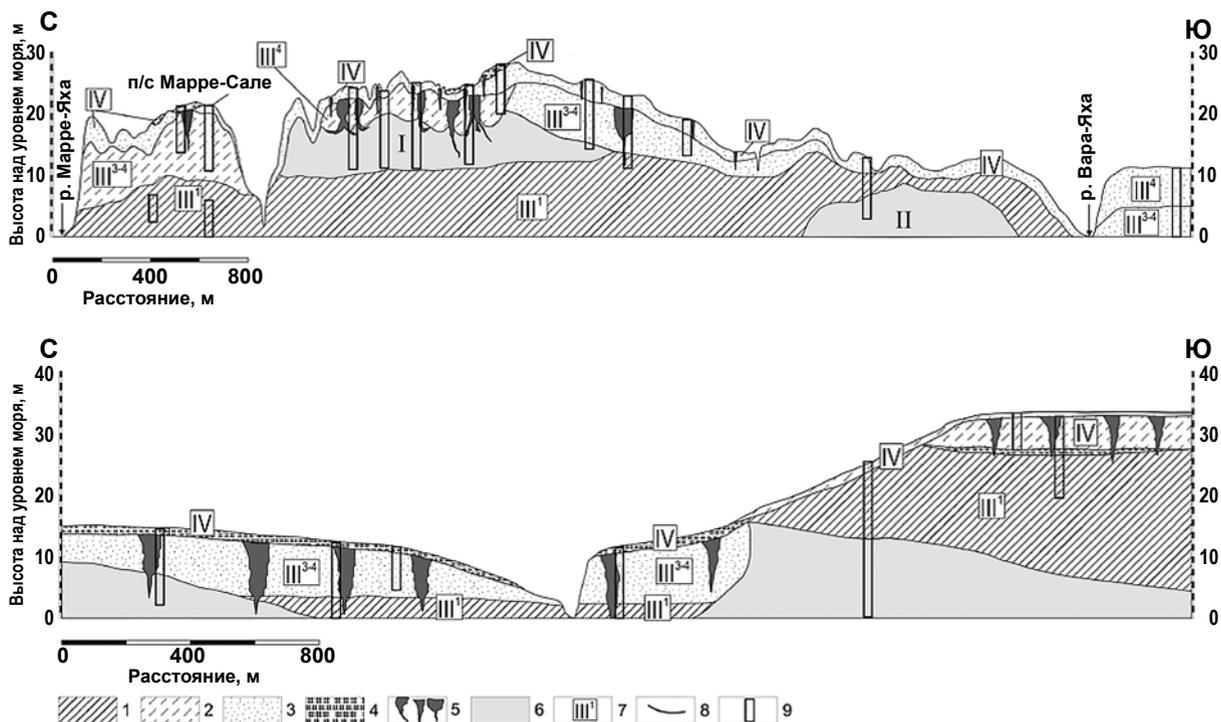


Рис. 3. Геолого-криолитологическая схема строения береговых разрезов районов исследования: а – Марре-Сале; б – Сопочная Карга [29]. Условные обозначения: 1 – суглинок, глина; 2 – супесь; 3 – песок; 4 – торф; 5 – полигонально-жильные льды; 6 – пластовые льды; 7 – геолого-генетический индекс отложений; 8 – литологическая граница; 9 – места расчисток и отбора проб. Размеры жил даны вне масштаба

Fig. 3. Geological and cryolithological structure of coastal sections at two study sites: а – Marre-Sale; б – Sopochnaya Karga [29]. Legend: 1 – loam, clay; 2 – loamy sand; 3 – sand; 4 – peat; 5 – ice wedges; 6 – tabular massive ground ice; 7 – geological and genetic index of deposits; 8 – lithological boundary; 9 – places of clearing and sampling. The sizes of ice wedges are given out of scale

что содержание метана в воздушных пузырьках низкое и варьирует в очень небольших пределах, достигая значения 0,1 ppm. Проведенные исследования позволяют утверждать, что газовая составляющая подземных льдов не связана с глубинными эманациями и имеет местное происхождение вследствие разложения органического вещества во вмещающих отложениях с образованием CH_4 и CO , а также обусловлена поступлением атмосферных осадков, что фиксируется присутствием CH_3Cl .

Полярная станция Марре-Сале находится на западном побережье полуострова Ямал. Разрез четвертичных отложений в этом районе является опорным для геокриологических исследований и достаточно хорошо изученным [24–27].

Абсолютные отметки поверхности побережья в районе полярной станции изменяются от 10 до 29 м. Наблюдения за динамикой термоабразии ведутся здесь с 1978 г. Средние скорости отступления бровки берегового обрыва составляют 1,3–1,8 м/год при экстремальных значениях 0 и 3,5 м/год [28].

Разрез четвертичных отложений представлен позднелейстоценовыми и голоценовыми морскими и континентальными толщами (рис. 3а). Нижняя часть разреза представлена засоленными морскими глинами и суглинками с прослоями заиленных супе-

сей и песков позднелейстоценового возраста (III¹), формировавшихся во время морской изотопной стадии (МИС 5). Содержание $C_{\text{орг}}$ в морской толще составляет 0,84%. Отложения промерзали эпигенетически, после регрессии морского бассейна. Верхняя часть разреза сложена комплексом континентальных песчаных и песчано-глинистых отложений позднелейстоценового возраста (III³⁻⁴), накапливающихся во время МИС 3 и МИС 2 [27]. В континентальных отложениях содержание $C_{\text{орг}}$ меньше, чем в подстилающих глинах, среднее значение составляет 0,34%. Завершает разрез голоценовый комплекс мало-мощных аллювиальных и эоловых песков и торфа. В толщу континентальных отложений включены два яруса ПЖЛ: голоценового (МИС 1) и доголоценового (МИС 3, МИС 2) возраста [27].

В толщу морских отложений включены ПЛ двух типов. Первый тип (рис. 4) приурочен к контакту морских глин и песчано-глинистых континентальных отложений и представляет собой линзу мощностью 3–10 м и протяженностью около 300 м. Прослойки чистого льда чередуются с ледогрунтовыми прослоями, в разной степени обогащенными минеральным и органическим материалом. Лед содержит воздушные пузырьки диаметром 1–2 мм округлой и вытянутой формы, газ в которых находится под



Рис. 4. Контакт полигонально-жильных льдов и ледогрунта, Марре-Сале (фото И. Д. Стрелецкой)
 Fig. 4. Contact of polygonal ice wedges and ice ground, Marre Sale (photo by I. D. Streletskaaya)

давлением. Второй тип представлен ледяной линзой в морских глинистых отложениях видимой мощностью 6—8 м и протяженностью около 150—200 м, уходящей под уровень моря (рис. 5). Лед содержит многочисленные круглые пузырьки газа диаметром до 4 мм, которые неравномерно распределены в массиве льда. Газ в пузырьках также находится под давлением [27].

Исследование показало резкое преобладание двухвалентных форм железа над трехвалентными во вмещающих подземные льды отложениях. Отношение Fe_2O_3/FeO в дислоцированной сильнольдистой толще составляет 0,6—0,9, а в отдельных образцах железо представлено только FeO . Такая же закономерность отмечается и для континентальной пачки, включающей сингенетические ПЖЛ, где отношение Fe_2O_3/FeO снижается до 0,1—0,4, а в отдельных образцах железо представлено только FeO . Исключение составляют отложения на контакте между морской и континентальными толщами, который маркируется ожелезненными гальками с присутствием большого количества органического углерода ($C_{орг} = 0,8\%$), где отношение Fe_2O_3/FeO равно 1,1, а содержание трехвалентного железа составляет 1,74% [29].

Из углеводородных газов в воздушных пузырьках в подземных льдах и в межпоровом пространстве вмещающих отложений преобладает метан. Средние концентрации метана в воздушных пузырьках полигонально-жильных льдов составляют 209 ppm для голоценовых ПЖЛ и 113 ppm для верхнеплейстоценовых. В пластовых льдах обоих типов в Марре-Сале концентрация метана в воздушных пузырьках на порядок выше, чем в ПЖЛ. Среднее значение концентрации метана в пузырьках в ПЛ первого типа составляет 5854 ppm, в ПЛ второго — 2459 ppm, а в отдельных образцах достигает 23 352 ppm. Высокое содержание метана в ПЛ — результат его миграции из вмещающих пород при промерзании и концентрирования при образовании ледяного тела. Наибольшие концентрации метана характерны для засоленных морских глин и суглинков казанцевского времени (МИС 5) — 2246 ppm. Минимальные средние содержания метана от 112 до 185 ppm характерны для пресных песков и супесей, включая суглинки континентального генезиса [11].

Сопочная Карга. Третий участок исследования находится в районе мыса Сопочная Карга в устье Енисея. Еще в 1980 г. в результате термоденудационных процессов на берегу Енисейского залива об-



Рис. 5. Выходы «черного» пластового льда на участке Марре Сале. Цвет из-за включений марказита (фото И. Д. Стрелецкой)
Fig. 5. Outcrops of “black” tabular massive ground ice in the Marre Sale section. Color due to marcasite inclusions
(photo by I. D. Streletskaaya)

разовался термоцирк, который активно расширяется. Скорость роста термоцирка достигает 8 м/год [30].

На протяженном участке побережья с абсолютными отметками от 10 до 35 м обнажаются четвертичные отложения и подземные льды различного возраста и генезиса. Разрез четвертичных отложений в районе мыса Сопочная Карга (см. рис. 36), как и в районе станции Марре-Сале, формировался в условиях смены континентального и морского осадконакопления, что характерно для севера Западной Сибири. Особенности геологического и геокриологического строения были опубликованы ранее [31].

Отложения формировались в позднем неоплейстоцене-голоцене (МИС 5 — МИС 1). Нижнюю часть разреза слагают засоленные морские глины и суглинки казанцевского времени (МИС 5). Среднее содержание $C_{орг}$ в глинах составляет около 1%. Глины перекрывает толща континентальных песков и супесей (МИС 3 — МИС 2). Среднее содержание $C_{орг}$ в них менее 0,7%. Завершает разрез голоценовый торфяник мощностью 1—2 м. Геологическое и криогенное строение в северной и южной части обнажения отличается. Так, в северной части в разрезе присутствует один ярус сингенетических ПЖЛ, образовавшийся во время накопления и промерзания аллювия в МИС 3-2. Аллювий подстилается мерзлы-

ми засоленными морскими глинами с линзами ПЛ. Здесь, как и в районе полярной станции Марре-Сале, ПЛ залегает на контакте морских и континентальных толщ (рис. 6). Ледяная линза состоит из чередующихся прослоев чистого и обогащенного минеральными частицами льда. ПЛ похож на ПЛ первого типа на участке Марре-Сале. В южной части разреза (см. рис. 36) присутствуют два яруса жильных льдов. Вмещающие нижний ярус сингенетических ПЖЛ пылеватые пески и супеси с органикой имеют возраст III⁴ (МИС 2). Содержание $C_{орг}$ в этом горизонте достигает 1,5%. Помимо нижнего яруса сингенетических льдов в разрезе присутствуют голоценовые ПЖЛ верхнего яруса, формирование которых началось после голоценового «оптимума».

В районе мыса Сопочная Карга были измерены концентрации метана в ПЛ и ПЖЛ. Наименьшее среднее содержание метана характерно для позднелепистоценовых ПЖЛ — 68 ppm. Среднее содержание метана в ПЛ — 474 ppm, что на порядок ниже, чем в похожем ПЛ в районе Марре-Сале [11].

Результаты исследования

Общее количество вещества, ежегодно поступающего в Карское море за счет разрушения берегов, было оценено в 35 млн т, при этом выделяется



Рис. 6. Пластовые льды в районе Сопочной Карги (фото И. Д. Стрелецкой)
 Fig. 6. Tabular massive ground ice in the area of Sopochnaya Karga (photo by I. D. Streletskaaya)

0,4 млн т органического углерода [8]. Аэробная минерализация поступившего органического вещества из побережья криолитозоны приводит к эмиссии CO_2 и к потреблению большого количества кислорода (табл. 2).

Геохимические исследования подземных льдов в районе полярной станции Марре-Сале и урочища Шпиндлера показали высокое содержания железа, в особенности двухвалентного. Окисленные высвобождаемые из ММП низковалентные металлы (преимущественно железо) требуют расходования большого количества кислорода из атмосферы, что внесет изменения в общий баланс кислорода как в атмосфере, так и в гидросфере, и как следствие будет способствовать усилению аноксидных процессов в Арктическом воздушном бассейне. На примере урочища Шпиндлера были определены объемы потребления кислорода на окисление

Fe (II) в расплаве льда и терригенном компоненте рыхлых отложений для разных термоцирков (табл. 3).

Быстрое окисление двухвалентного железа способствует образованию нестабильного окисла железа — ферригидрида, который при гидролизе Fe (III) выпадает в осадок. Также для урочища Шпиндлера были рассчитаны объемы выпадения в осадок тонкодисперсного ферригидрида при гидролизе Fe (III) в расплаве льда и терригенной компоненте рыхлых отложений (табл. 4).

Оценено содержание метана во льдах и четвертичных отложениях в береговых обнажениях участков Карского моря [11]. Полученные

Таблица 2. Объемы выделения CO_2 и потребления кислорода при аэробной минерализации ОВ (органического вещества) в прибрежной зоне урочища Шпиндлера (1947—2000 гг.), т

Анализируемый термоцирк	Объем выделения CO_2		Объем потребления O_2	
	Песок	Глина	Песок	Глина
Западный	77,84	3 867,20	73,60	3 656,45
Центральный	130,78	2 784,38	123,651	2 632,64
Восточный	181,50	2 254,02	171,601	2 131,19
Эмбриональный	61,61	3 060,61	58,2538	2 893,82
Сумма	451,74	11 966,23	4 227,12	11 314,12

Таблица 3. Объемы потребления кислорода на окисление Fe (II) в расплаве льда и терригенном компоненте рыхлых отложений в прибрежной зоне урочища Шпиндлера (1947—2000 гг.), т

Анализируемый термоцирк	Расплав льда	Терригенный компонент	
		Песок	Глина
Западный	0,0076	827,3	1099,0
Центральный	0,0091	1389,8	791,3
Восточный	0,0111	1928,7	640,6
Эмбриональный	0,0060	654,7	869,8
Сумма	0,0338	4800,5	3400,7

Таблица 4. Объемы выпадения в осадок тонкодисперсного ферригидрида при гидролизе Fe (III) в расплаве льда и терригенном компоненте рыхлых отложений в прибрежной зоне урочища Шпиндлера (1947—2000 гг.), т

Анализируемый термоцирк	Расплав льда	Терригенный компонент	
		Песок	Глина
Западный	0,3888	829,6	2 996,6
Центральный	0,4665	1 393,8	2 157,6
Восточный	0,5666	1 934,3	1 746,6
Эмбриональный	0,3077	656,6	2 371,6
Сумма	1,7296	4 814,3	9 272,4

Таблица 5. Ежегодная эмиссия газов в атмосферу при термоденудации и термоабразии, рассчитанная для термоцирка урочища Шпиндлер

Газ	min, т	max, т
CO	0,08	5,71
CH ₄	0,22	6,59
CH ₃ Cl	0,00	1,85

Таблица 6. Ежегодная эмиссия газов в атмосферу при термоденудации и термоабразии арктического побережья России

Газ	min, т	max, т
CO	7,2	516
CH ₄	2,0	595
CH ₃ Cl	0,0	167

данные по объемам выноса терригенного материала и среднему по разрезу содержанию метана в отложениях и льдах позволяет в первом приближении оценить объем эмиссии метана за счет термоабразии морских берегов Карского моря. Величина эмиссии метана оценивается в 10—30 млн м³, или 0,8—2,0 т в год. С учетом криогенного строения побережья Карского моря и рассчитанных концентраций метана во льдах и отложениях эмиссия метана за счет разрушения морских берегов Карского моря оценивается в незначительную величину по сравнению с общим содержанием метана в атмосфере, а термоабразия не является значимым источником поступления метана в атмосферу [10].

Были рассчитаны объемы выделения газов для урочища Шпиндлера (табл. 5), а также на основании обобщения литературных данных сделан расчет для всего арктического побережья России (табл. 6).

Учет возможных потоков миграции химических элементов и их соединений, выделяющихся при разрушении берегов, сложенных многолетнемерзлыми породами, позволили построить геохимическую модель деструктивных криогенных процессов в прибрежно-шельфовой зоне западной Арктики (рис. 7). Схема условно отражает строение деградирующих берегов криолитозоны, сложенных ММП и содержащих подземные льды разного генезиса (ПЛ и ПЖЛ). Согласно данной модели можно выделить следующие геохимические процессы, приводящие к изменениям параметров геосистем:

- процессы, связанные с потреблением кислорода вследствие окисления восстановленных форм элементов в разрушающихся мерзлых породах; к ним прежде всего относятся окисления двухвалентного железа (связанного с терригенной компонентой и талой водой), органического углерода, метана и угарного газа;
- процессы, приводящие к аноксидной обстановке в прибрежной зоне вследствие образования береговых баров и формирования восстановительных условий, связанных с окислением двухвалентного железа и разложением органического вещества;
- процессы поступления масс тонкодисперсных частиц в прибрежные воды при разрушении мерзлых пород, снижающих интенсивность процессов фотосинтеза в морской воде;
- процессы выделения газов при разрушении мерзлых пород.

Выводы

Для верхнеплейстоценовых отложений побережья севера Западной Сибири характерно

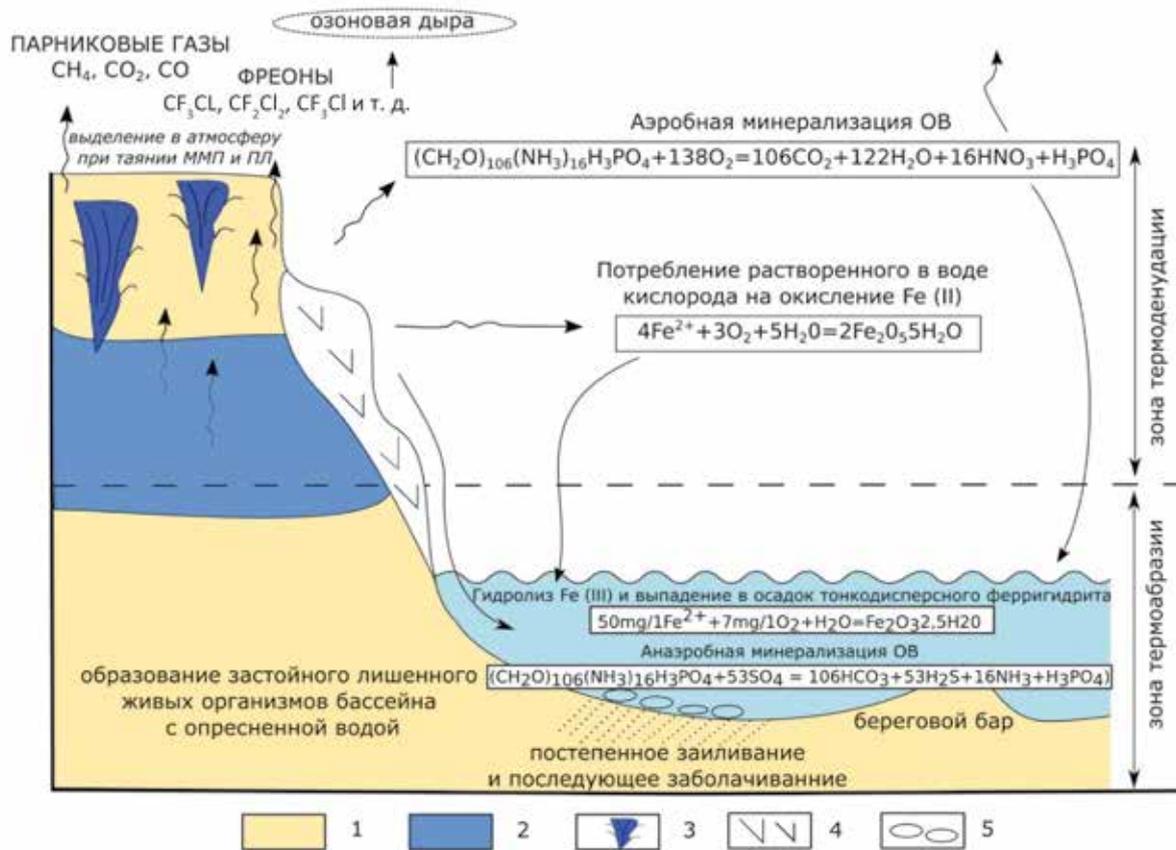


Рис. 7. Геохимическая модель деструктивных криогенных процессов в прибрежно-шельфовой зоне западной Арктики. Условные обозначения: 1 – многолетнемерзлые породы, 2 – пластовый лед, 3 – полигонально-жильные льды, 4 – склоновые процессы, 5 – тонкодисперсный материал
 Fig. 7. Geochemical model of destructive cryogenic processes in the coastal-shelf zone of the Western Arctic. Legend: 1 – permafrost, 2 – tabular massive ground ice, 3 – ice wedges, 4 – slope processes, 5 – fine-grained sediment

Научные исследования в Арктике

чередование морских и континентальных условий осадконакопления. Последние сопровождались эпигенетическим промерзанием пород, образованием пластовых льдов и ростом сингенетических полигонально-жильных льдов.

Вследствие современных климатических изменений берега, сложенные ММП, интенсивно разрушаются. При этом существенное влияние на скорости термоденудации и термоабразии оказывает присутствие в разрезе подземных льдов. В пределах побережий западного сектора Арктики развиты два морфологических типа термоабразии береговой зоны: линейное, однонаправленное отступление перпендикулярно наблюдаемой береговой линии и объемное — трехнаправленное отступление с образованием термоцирков. Скорость отступления на отдельных участках может достигать 3 м/год и выше.

На основании построенной геохимической модели термоабразии и термоденудации в прибрежно-шельфовой зоне западной Арктики выделены процессы, приводящие к изменениям береговых геосистем, в частности появление застойных участков с образованием баров за счет сноса тонкодисперсных частиц в прибрежные воды, в пределах которых

нарушается кислородный режим вследствие окисления веществ, поступающих из разрушающихся береговых отложений. Выделение газов при разрушении ММП и подземных льдов в большей степени влияет на общий баланс газов в атмосфере.

Оценка баланса поступления отдельных химических элементов и их соединений, высвобождаемых при термоденудации и термоабразии берегов, показывает, что:

- объем потребляемого кислорода при совокупности процессов термоденудации и термоабразии в береговой зоне арктических морей сопоставим по порядку величин с его объемом, получаемым в процессе фотодиссоциации воды $H_2O \rightarrow H_2 + O_2$ в верхних слоях атмосферы, являющимися основным абиогенным источником поступления кислорода в атмосферу;
- количество кислорода, требуемого для окисления Fe (II) при таянии многолетнемерзлых пород в течение года, содержится примерно в 1 км³ воды; при отсутствии или ограничении быстрого обмена водных масс внутри бассейна (в частности образовании и промерзании баров) кислород, содержащийся в морской воде береговой зоны,

будет полностью исчерпан для окисления железа, что приведет к полной стагнации биоты прибрежных зон, а также к развитию анаэробных процессов, сопровождающихся сероводородным заражением;

- значительные вариации концентраций CH_4 в отложениях и льдах указывают на возможные скопления этих газов в «ловушках» внутри мерзлых пород; такие скопления газа могут вызвать опасные ситуации, связанные с их разрушением.

Исследования выполнены при поддержке гранта РФФИ № 18-05-60080 «Опасные нивально-гляциальные и криогенные процессы и их влияние на инфраструктуру в Арктике» и частичной поддержке в рамках государственного задания по теме «Изменение криосферы Земли под влиянием природных факторов и техногенеза» НИР АААА-А16-116032810095-6, ПП 55 Арктика.

Литература

1. Lantuit H., Overduin P. P., Couture N. et al. The Arctic Coastal Dynamics database: a new classification scheme and statistics on Arctic permafrost coastlines // *Estuaries and Coasts*. — 2012. — Vol. 35. — P. 383—400. — DOI: 10.1007/s12237-0109362-6.
2. Васильев А. А., Стрелецкая И. Д., Черкашев Г. А., Ванштейн Б. Г. Динамика берегов Карского моря // *Криосфера Земли*. — 2006. — Т. 10, № 2. — С. 56—67.
3. Кузяков А. И., Лейбман М. О., Передня Д. Д. Деструктивные рельефообразующие процессы побережий арктических равнин с пластовыми подземными льдами // *Криосфера Земли*. — 2006. — Т. 10, № 2. — С. 79—89.
4. Крицук Л. Н., Дубровин В. А., Ястреба Н. В. Результаты комплексного изучения динамики береговой зоны Карского моря в районе метеостанции Марре-Сале с использованием ГИС-технологий // *Криосфера Земли*. — 2014. — Т. 18, № 4. — С. 59—69.
5. Кошелева В. А., Яшин Д. С. Донные осадки арктических морей России / Под ред. И. С. Грамберга. — СПб.: ВНИИОкеангеология, 1999. — 286 с.
6. Rachold V., Grigoriev M. N., Are F. E. et al. Coastal erosion vs riverine sediment discharge in the Arctic shelf seas // *Intern. J. Earth Sci.* — 2000. — № 89. — P. 450—460. — DOI: 10.1007/s005310000113.
7. Stein R., Macdonald R. W. Organic carbon budget: Arctic Ocean vs. Global Ocean // *The organic carbon cycle in the Arctic Ocean* / R. Stein, R. W. Macdonald (eds.). — Berlin: Springer Verl., 2003. — P. 169—177. — DOI: 10.1007/978-3-642-18912-8_8.
8. Стрелецкая И. Д., Васильев А. А., Каневский М. З. и др. Органический углерод в четвертичных отложениях побережья Карского моря // *Криосфера Земли*. — 2006. — Т. 10, № 4. — С. 35—43.
9. Ривкина Е. М., Краев Г. Н., Кривушин К. В. и др. Метан в вечномёрзлых отложениях северо-восточного сектора Арктики // *Криосфера Земли*. — 2006. — Т. 10, № 3. — С. 23—41.
10. Васильев А. А., Стрелецкая И. Д., Облогов Г. Е. Эмиссия метана при разрушении берегов Карского моря // *Научное сетевое издание «Актуальные проблемы нефти и газа» / ИПНГ РАН*. — 2018. — Vol. 4. — P. 1—3. — DOI: 10.29222/ipng.2078-5712.2018-23.art52.
11. Стрелецкая И. Д., Васильев А. А., Облогов Г. Е. и др. Метан в подземных льдах и мерзлых отложениях на побережье и шельфе Карского моря // *Лед и Снег*. — 2018. — С. 65—77. — DOI: 10.15356/2076-6734-2018-1-65-77.
12. Shakhova N., Semiletov I., Salyuk A. et al. Extensive methane venting to the atmosphere from sediments of the East Siberian Arctic shelf // *Science*. — 2010. — № 327. — P. 1246—1250. — DOI: 10.1126/science.1182221.
13. Streletskiy D. A., Anisimov O. A., Vasiliev A. A. Permafrost degradation // *Snow and Ice-Related Hazards, Risks and Disasters*. — Chap. 10. — [S. l.]: Elsevier, 2014. — P. 303—344. — DOI: 10.1016/B978-0-12-394849-6.00010-X.
14. Советская Арктика. Моря и острова Северного Ледовитого океана / Ред. Я. Я. Гаккель, Л. С. Говоруха. — М.: Наука, 1970. — 526 с.
15. Арз Ф. Э. Термоабразия морских берегов. — М.: Наука, 1980. — 159 с.
16. Васильев А. А., Покровский С. И., Шур Ю. Л. Динамика термоабразионных берегов Западного Ямала // *Криосфера Земли*. — 2001. — Т. 5, № 1. — С. 44—52.
17. Барабанов В. Ф. Современные физические методы в геохимии. — Л.: Изд. ЛГУ, 1990. — 389 с.
18. Драго Р. Физические методы в химии. — М.: Мир, 1981. — 424 с.
19. Ливер Э. Электронная спектроскопия неорганических соединений: в 2 ч. — Ч. 2. — М.: Мир, 1987. — 445 с.
20. Гольдфарб Ю. И., Ежова А. Б. Ископаемые пластовые льды на п-ове Югорском // *Вопросы развития и освоения мерзлых толщ*. — Якутск: Ин-т мерзлотоведения СО АН СССР, 1990. — С. 22—31.
21. Лейбман М. О., Васильев А. А., Рогов В. В. и др. Исследование пластового льда Югорского полуострова кристаллографическими методами // *Криосфера Земли*. — 2000. — Т. 4, № 2. — С. 31—40.
22. Manley W. F., Lokrants H., Gataullin V. N. et al. Late Quaternary stratigraphy, Radiocarbon chronology, and Glacial history at cape Shpindler, Southern Kara Sea, Arctic Russia // *Global and Planetary Change*. — 2001. — Vol. 31. — P. 239—254. — DOI: 10.1016/S0921-8181(01)00122-9.
23. Ванштейн Б. Г., Лейбман М. О., Пивень П. И. и др. Изучение генезиса пластового льда на основании анализа распределения редкоземельных элементов // *Криосфера Земли*. — 2002. — Т. 4, № 4. — С. 40—48.
24. Forman S. L., Ingolfsson O., Gataullin V. et al. Late Quaternary stratigraphy, glacial limits and paleoenvironments of Maresale area, western Yamal Peninsula, Russia // *Quaternary Re-*

search. — 2002. — Vol. 21. — pp. 1—12. — DOI: 10.1130/0091-7613(1999)027<0807:LQSOWY>2.3.CO;2.

25. Каневский М. З., Васильев А. А., Стрелецкая И. Д. Закономерности формирования криогенного строения четвертичных отложений Западного Ямала (на примере района Марре-Сале) // Криосфера Земли. — 2005. — Т. 9, № 3. — С. 16—27.

26. Крицук Л. Н. Подземные льды Западной Сибири. — М.: Науч. мир, 2010. — 352 с.

27. Стрелецкая И. Д., Васильев А. А., Облогов Г. Е., Матюхин А. Г. Изотопный состав подземных льдов Западного Ямала (Марре-Сале) // Лед и Снег. — 2013. — № 2. — С. 83—92.

28. Vasiliev A. A., Kanevskiy M. Z., Cherkashov G. A., Vanshtein B. G. Coastal dynamics at the Barents and Kara Sea key sites // Geo Marine Lett. —

2005. — № 25. — P. 110—120. — DOI: 10.1007/s00367-004-0192-z.

29. Стрелецкая И. Д., Ванштейн Б. Г., Васильев А. А. и др. Особенности накопления и промерзания отложений в переходной зоне суша-море (Западная Арктика) // Геология морей и океанов. Материалы XXIII Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. Москва, 18—22 ноября 2019 г. — М.: ИО РАН. — 2019. — Vol. 1. — P. 213—217.

30. Гусев Е. А. Наблюдения за геоморфологическими процессами на севере Западной Сибири (на примере района Сопочной Карги) // Успехи соврем. естествознания. — 2011. — № 9. — С. 19—22.

31. Стрелецкая И. Д., Гусев Е. А., Васильев А. А. и др. Геокриологическое строение четвертичных отложений берегов Западного Таймыра // Криосфера Земли. — 2013. — Т. 17, № 3. — С. 17—26.

Информация об авторах

Ванштейн Борис Георгиевич, кандидат геолого-минералогических наук, заместитель генерального директора, заведующий отделом литологии и геохимии, ФГБУ «ВНИИОкеангеология» (190121, Россия, Санкт-Петербург, Английский просп., д. 1), e-mail: vanshbor@mail.ru.

Стрелецкая Ирина Дмитриевна, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, доцент, географический факультет, МГУ им. М. В. Ломоносова (119991, Россия, Москва, ГСП-1 Ленинские горы), e-mail: irinastrelets@gmail.com.

Письменюк Анфиса Александровна, инженер I категории отдела литологии и геохимии, ФГБУ «ВНИИОкеангеология» (190121, Санкт-Петербург, Английский просп., д. 1), e-mail: apismeniuk@gmail.com.

Библиографическое описание данной статьи

Ванштейн Б. Г., Стрелецкая И. Д., Письменюк А. А. Геосистемы берегов Карского моря в условиях изменяющегося климата // Арктика: экология и экономика. — 2020. — № 3 (39). — С. 73—86. — DOI: 10.25283/2223-4594-2020-3-73-86.

COASTAL GEOSYSTEMS OF THE KARA SEA IN A CHANGING CLIMATE

Vanshtein B. G.

FSBI “All-Russian Research Institute of Geology and Mineral Resources of the World Ocean named after academician Igor Gramberg” (St. Petersburg, Russian Federation)

Streletskaia I. D.

Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography (Moscow, Russian Federation)

Pismeniuk A. A.

FSBI “All-Russian Research Institute of Geology and Mineral Resources of the World Ocean named after academician Igor Gramberg” (St. Petersburg, Russian Federation)

The article was received on May, 14, 2020

Abstract

Current climate changes cause an increase both in coastal retreat rates and in sediment intake of the water area. The presence of ground ice in coastal outcrops additionally accelerates these processes. The researchers identify two morphological types of coastal zone destruction for the Western part of the Arctic — linear and volumetric. The retreat rate in some areas reaches 3 m/year and above. Together with terrigenous material, organic matter, gases, occluded in ice and sediments, and low-valent metal ions (mainly Fe (II)) enter the water, thus causing a change in physicochemical parameters of the coastal zone environment. The researches performed geochemi-

cal studies of ground ice and host sediments on three sections of the Kara Sea coast (Spindler area; Marre-Sale subsoil; Sopochnaya Karga subsoil). The results allowed developing a geochemical model of changes in the geosystems of the coastal-shelf zone under current climate warming conditions in the Arctic. The researchers have identified processes causing changes in coastal geosystems: a decrease in the concentration of oxygen in water due to the oxidation of substances coming from decaying coastal deposits, the drift of fine particles into coastal waters, and the release of gases during destruction of permafrost and ground ice. The volume of oxygen consumed during coastal destruction is comparable in order of magnitude with its volume obtained in the process of photodissociation of water in the upper atmosphere. The oxidation of Fe (II) during thawing of the permafrost requires the amount of oxygen contained in about 1 km³ of water. In the absence or limitation of the rapid exchange of water masses inside the basin, the oxygen contained in seawater will be completely exhausted for iron oxidation, which will lead to both complete stagnation of the coastal biota and development of anaerobic processes. Significant variations in the CH₄ concentrations in sediments and ice indicate possible accumulations of these gases in “traps” inside frozen rocks. Their destruction can be dangerous for coastal geosystems.

Keywords: coast of the Kara Sea, permafrost, coastal processes, methane, organic carbon, geochemistry of ground ice and sediments.

The studies are supported by the RFBR grant No.18-05-60080 “Dangerous nival-glacial and cryogenic processes and their influence on the infrastructure in the Arctic” and partial support within the framework of the State assignment on the topic “Earth Cryosphere Change under the Influence of Natural Factors and Technogenesis” AAAA Research-A16-116032810095-6, PP 55 Arctic.

References

1. Lantuit H., Overduin P. P., Couture N. et al. The Arctic Coastal Dynamics database: a new classification scheme and statistics on Arctic permafrost coastlines. *Estuaries and Coasts*, 2012, vol. 35, pp. 383—400. DOI: 10.1007/s12237-0109362-6.
2. Vasil'ev A. A., Streletsкая I. D., Cherkashev G. A., Vanshtein B. G. Dinamika beregov Karskogo morya. [Coastal dynamics of the Kara Sea]. *Kriosfera Zemli*, 2006, vol. 10, no. 2, pp. 56—67. (In Russian).
3. Kizyakov A. I., Leibman M. O., Perednya D. D. Destrukтивnye rel'efobrazuyushchie protsessy poberezhii arkticheskikh ravnin s plastovymi podzemnymi l'dami. [Destructive relief-forming processes at the coasts of the Arctic plains with tabular ground ice]. *Kriosfera Zemli*, 2006, vol. 10, no. 2, pp. 79—89. (In Russian).
4. Kritsuk L. N., Dubrovin V. A., Yastreba N. V. Rezul'taty kompleksnogo izucheniya dinamiki beregovoi zony Karskogo morya v raione meteostantsii Marre-Sale s ispol'zovaniem GIS-tehnologii. [Results of complex study of the Kara Sea shore dynamics in the area of the meteorological station Marre-Sale, using GIS-technologies]. *Kriosfera Zemli*, 2014, vol. 18, no. 4, pp. 59—69. (In Russian).
5. Kosheleva V. A., Yashin D. S. Donnye osadki arkticheskikh morey Rossii. [The bottom sediments of the Russia Arctic Seas]. Pod red. I. S. Gramberga. St. Petersburg, VNIIOkeangeologiya, 1999, 286 p. (In Russian).
6. Rachold V., Grigoriev M. N., Are F. E. et al. Coastal erosion vs riverine sediment discharge in the Arctic shelf seas. *Intern. J. Earth Sci.*, 2000, no. 89, pp. 450—460. DOI: 10.1007/s005310000113.
7. Stein R., Macdonald R. W. Organic carbon budget: Arctic Ocean vs. Global Ocean // The organic carbon cycle in the Arctic Ocean. R. Stein, R. W. Macdonald (eds.). Berlin, Springer Verl., 2003, pp. 169—177. DOI: 10.1007/978-3-642-18912-8_8.
8. Streletsкая I. D., Vasil'ev A. A., Kanevskii M. Z. et al. Organicheskie uglevodki v chetvertichnykh otlozheniyakh poberezh'ya Karskogo morya. [Organic carbon in the coastal Quaternary sediments of the Kara Sea]. *Kriosfera Zemli*, 2006, vol. 10, no. 4, pp. 35—43. (In Russian).
9. Rivkina E. M., Kraev G. N., Krivushin K. V. et al. Metan v vechnomerzlykh otlozheniyakh severo-vostochnogo sektora Arktiki. [Methane in Permafrost of Northeastern Arctic]. *Kriosfera Zemli*, 2006, vol. 10, no. 3, pp. 23—41. (In Russian).
10. Vasil'ev A. A., Streletsкая I. D., Oblogov G. E. Emisiya metana pri razrushenii beregov Karskogo morya. [Methane emission due to Kara Sea shores destruction]. *Nauchnoe setevoe izdanie “Aktual'nye problemy nefti i gaza”*. IPNG RAN, 2018, vol. 4, pp. 1—3. DOI: 10.29222/ipng.2078-5712.2018-23.art52. (In Russian).
11. Streletsкая I. D., Vasil'ev A. A., Oblogov G. E. et al. Metan v podzemnykh l'dakh i merzlykh otlozheniyakh na poberezh'e i shel'fe Karskogo morya. [Methane in ground ice and frozen sediments in the coastal zone and on the shelf of Kara Sea]. *Led i Sneg*, 2018, 58 (1), pp. 65—77. DOI: 10.15356/2076-6734-2018-1-65-77. (In Russian).
12. Shakhova N., Semiletov I., Salyuk A. et al. Extensive methane venting to the atmosphere from sediments of the East Siberian Arctic shelf. *Science*, 2010, no. 327, pp. 1246—1250. DOI: 10.1126/science.1182221.
13. Streletskiy D. A., Anisimov O. A., Vasiliev A. A. Permafrost degradation. *Snow and Ice-Related Hazards, Risks and Disasters*. Chap. 10. [S. l.], Elsevier, 2014, pp. 303—344. DOI: 10.1016/B978-0-12-394849-6.00010-X.
14. Sovetskaya Arktika. Morya i ostrova Severnogo Ledovitogo okeana. [Soviet Arctic Seas and Islands of the Polar Basin]. Red. Ya. Ya. Gakkel', L. S. Govorukha. Moscow, Nauka, 1970, 526 p. (In Russian).

15. Are F. E. Termoabraziya morskikh beregov. [Thermal abrasion of sea coasts]. Moscow, Nauka, 1980, 159 p. (In Russian).
16. Vasil'ev A. A., Pokrovskii S. I., Shur Yu. L. Dinamika termoabrazionnykh beregov Zapadnogo Yamala. [Dynamics of the coastal thermoerosion of West Yamal]. Kriosfera Zemli, 2001, vol. 5, no. 1, pp. 44—52. (In Russian).
17. Barabanov V. F. Sovremennye fizicheskie metody v geokhimii. [Modern physical methods in geochemistry]. Leningrad, Izd. LGU, 1990, 389 p. (In Russian).
18. Drago R. Fizicheskie metody v khimii. Moscow, Mir, 1981, 424 p. (In Russian).
19. Liver E. Elektronnaya spektroskopiya neorganicheskikh soedinenii: V 2 ch. [Electronic spectroscopy of inorganic compounds. In 2 parts. Chap. 2]. Moscow, Mir, 1987, 445 p. (In Russian).
20. Gol'dfarb Yu. I., Ezhova A. B. Iskopaemye plastovye l'dy na p-ove Yugorskom. [Fossil tabular ice on Yugorsky Peninsula]. Voprosy razvitiya i osvoeniya merzlykh tolshch. Yakutsk, In-t merzlotovedeniya SO AN SSSR, 1990, pp. 22—31. (In Russian).
21. Leibman M. O., Vasil'ev A. A., Rogov V. V. et al. Issledovanie plastovogo l'da Yugorskogo poluostrova kristallograficheskimi metodami. [Massive ground ice studies on Yugorskiy peninsula, using crystallographic methods]. Kriosfera Zemli, 2000, vol. 4, no. 2, pp. 31—40. (In Russian).
22. Manley W. F., Lokrants H., Gataullin V. N. et al. Late Quaternary stratigraphy, Radiocarbon chronology, and Glacial history at cape Shpindler, Southern Kara Sea, Arctic Russia. Global and Planetary Change, 2001, vol. 31, pp. 239—254. DOI: 10.1016/S0921-8181(01)00122-9.
23. Vanshtein B. G., Leibman M. O., Piven' P. I. et al. Izuchenie genezisa plastovogo l'da na osnovanii analiza raspredeleniya redkozemel'nykh elementov. [Tabular ground ice origin study based on rare earth element distribution.]. Kriosfera Zemli, 2002, vol. 4, no. 4, pp. 40—48. (In Russian).
24. Forman S. L., Ingolfsson O., Gataullin V. et al. Late Quaternary stratigraphy, glacial limits and paleoenvironments of Maresale area, western Yamal Peninsula, Russia. Quaternary Research, 2002, vol. 21, pp. 1—12. DOI: 10.1130/0091-7613(1999)027<0807:LQSOWY>2.3.CO;2.
25. Kanevskii M. Z., Vasil'ev A. A., Streletskaya I. D. Zakonomernosti formirovaniya kriogenogo stroeniya chetvertichnykh otlozhenii Zapadnogo Yamala (na primere raiona Marre-Sale). [Formation of cryogenic structure of Quaternary sediments in Western Yamal (by the example of Marre-Sale area)]. Kriosfera Zemli, 2005, vol. 9, no. 3, pp. 16—27. (In Russian).
26. Kritsuk L. N. Podzemnye l'dy Zapadnoi Sibiri. [Ground Ice of Western Siberia]. Moscow, Nauch. mir, 2010, 352 p. (In Russian).
27. Streletskaya I. D., Vasil'ev A. A., Oblogov G. E., Matyukhin A. G. Izotopnyi sostav podzemnykh l'dov Zapadnogo Yamala (Marre-Sale). [Isotopic composition on ground ice in Western Yamal (Marre-Sale)]. Led i Sneg, 2013, no. 2, pp. 83—92. (In Russian).
28. Vasiliev A. A., Kanevskiy M. Z., Cherkashov G. A., Vanshtein B. G. Coastal dynamics at the Barents and Kara Sea key sites. Geo Marine Lett., 2005, no. 25, pp. 110—120. DOI: 10.1007/s00367-004-0192-z.
29. Streletskaya I. D., Vanshtein B. G., Vasil'ev A. A. et al. Osobennosti nakopleniya i promerzaniya otlozhenii v perekhodnoi zone susha-more (Zapadnaya Arktika). [Peculiarities of accumulation and freezing of deposits in the transitional land-sea zone (Western Arctic)] Geologiya morei i okeanov. Materialy XXIII Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii (Shkoly) po morskoi geologii. Moskva, 18—22 noyabrya 2019 g. Moscow, IO RAN, 2019. Vol. 1, pp. 213—217. (In Russian).
30. Gusev E. A. Nablyudeniya za geomorfologicheskimi protsessami na severe Zapadnoi Sibiri (na primere raiona Sopochnoi Kargi). [Observations of geomorphological processes in northern West Siberia (a case of the Sopochnaya Karga area)]. Uspekhi sovrem. estestvoznaniya, 2011, no. 9, pp. 19—22. (In Russian).
31. Streletskaya I. D., Gusev E. A., Vasil'ev A. A. et al. Geokriologicheskoe stroenie chetvertichnykh otlozhenii beregov Zapadnogo Taimyra. [Cryolithology stratification of quaternary sediments from West Taymyr coasts]. Kriosfera Zemli, 2013, vol. 17, no 3, pp. 17—26. (In Russian).

Information about the authors

Vanshtein Boris Georgievich, PhD of Geology and Mineralogy, Deputy Director General, Head of the Department of Lithology and Geochemistry, FSBI "VNIIOkeangeologia" (1, Angliyskiy av., St. Petersburg, Russia, 1190121), e-mail: vanshbor@mail.ru.

Streletskaya Irina Dmitrievna, PhD of Geology and Mineralogy, Senior Researcher, Associate Professor. Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University (1, Leninskiye gory, Moscow, Russia, 119991), e-mail: irinastrelets@gmail.com.

Pismeniuk Anfisa Aleksandrovna, First Category Engineer, FSBI "VNIIOkeangeologia" (1, Angliyskiy av., St. Petersburg, Russia, 1190121), e-mail: apismeniuk@gmail.com.

Bibliographic description of the article

Vanshtein B. G., Streletskaya I. D., Pismeniuk A. A. Coastal geosystems of the Kara Sea in a changing climate. Arctic: Ecology and Economy, 2020, no. 3 (39), pp. 73—86. DOI: 10.25283/2223-4594-2020-3-73-86. (In Russian).

© Vanshtein B. G., Streletskaya I. D., Pismeniuk A. A., 2020