А.В. Гаврилов¹, Е.И. Пижанкова²

КРИОЛИТОМОРФОГЕНЕЗ НА МЕЛКОВОДЬЯХ АРКТИЧЕСКИХ МОРЕЙ В СВЯЗИ С СОВРЕМЕННЫМ ПОТЕПЛЕНИЕМ

АННОТАЦИЯ

Охарактеризовано осадконакопление с образованием островов на банках и мелководьях морей Лаптевых и западной части Восточно-Сибирского. Эти острова формируются на месте островов-реликтов ледового комплекса позднего плейстоцена. Ранее в течение многих веков подводные возвышенности размывались, а морские глубины на их месте нарастали. Показано, что новообразование островов является следствием современного потепления. Потепление в Арктике усиливается повышением температуры придонной воды, сокращением ледовитости морей и понижением альбедо. Потепление приводит к увеличению темпов отступления льдистых берегов под действием термоабразии и термоденудации, стимулирует сезонное и многолетнее оттаивание донных пород. Результатом потепления является накопление огромного количества талых и сезонно оттаивающих осадков. Увеличение безлёдного времени и усиление штормовой активности приводят к усиленному волновому перемещению осадков.

Мелководьям арктических морей свойственно обилие ледяных образований – торосов и стамух. Перемещаемые волнением осадки складываются вокруг стамух, как у береговой черты. Стамухи стаивают в конце летнего сезона, а аккумулятивные образования – подводные и надводные, часто образованные в виде кольца – остаются. Низкие зимние температуры воздуха приводят к их промерзанию; при этом подводное промерзание происходит в слое смерзания сезонного льда с дном моря (слой припая). Таким образом, на Васильевской банке образовался кольцеобразный остров Яя, открытый в 2013 году. В последние годы на топографических картах в морях Лаптевых и запада Восточно-Сибирского появился ряд новых островов – Неизвестные к юго-востоку от Земли Бунге, Затопляемый – к востоку от дельты реки Лены.

Острова в виде колец или атоллов формировались и в прошлые потепления. В морях Лаптевых и Восточно-Сибирском – это острова Песчаный и Наносный. В холодной северо-восточной части Карского моря к островам с причленёнными дугообразными косами относятся острова Воронина, Уединения, острова архипелага Сергея Кирова и другие.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: банки и мелководья, субмаринные многолетнемерзлые породы, среднемноголетняя температура придонной воды и донных осадков, слой припая, прибрежно-морское осадконакопление, стамухи

¹ Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, геологический факультет, Ленинские горы, д. 1, 119991, Москва, Россия, e-mail: gavrilov@bk.ru

² Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, геологический факультет, Ленинские горы, д. 1, 119991, Москва, Россия, e-mail: pijanikova@yandex.ru

Anatoliy V. Gavrilov¹, Elena I. Pizhankova²

CRYOLITHOMORPHOGENESIS IN THE SHALLOWS OF THE ARCTIC SEAS IN CONNECTION WITH MODERN WARMING

ABSTRACT

The sedimentation with the formation of islands on the banks and shallows of the Laptev and western parts of the East Siberian Sea is characterized. These islands are formed on the site of islands-relicts of the late Pleistocene ice complex. Earlier for many centuries the underwater elevations were eroding, the depths of the sea in their place grew. It is shown that the appearance of islands is a consequence of modern warming. Warming in the Arctic is reinforced by an increase in the temperature of the bottom water, a reduction of ice coverage, and decrease in the albedo. Warming leads to an increase in the retreat rates of the icy coasts under the influence of thermal abrasion and thermal denudation, stimulates seasonal and long-term thawing of bottom sediments. The result of warming is the accumulation of a huge volume of thawed and seasonally thawing deposits. Elongation of ice-free period and intensification of storm activity lead to increased wave movement of sediments.

Shallows of the Arctic seas are characterized by an abundance of ropes and stamukhas. Sediments moved by waves are stored around the stamukhas, like the coastline. Stamukhas melts at the end of the summer season, and accumulative forms – underwater and above-water, often like a ring – remains. Low winter temperatures cause them to freeze. Underwater freezing occurs where the seasonal ice is frozen with the sea bottom (the fast ice layer). In this way, the ring-shaped island Yaya was formed on the Vasilievsky Bank. It was opened in 2013. In recent years, new islands have been designated on the topographic maps of the Laptev and East Siberian seas – Neizvestnyye to the southeast of Bunge Land, Zatoplyayemyy – east of the Lena river delta.

Islands in the form of a ring or atoll formed also in past warming. In the Laptev and East-Siberian seas, these are Peschanyy (Sandy) and Nanosnyy (Alluvial) islands. In the cold north-eastern part of the Kara Sea islands with arc shape spits include Voronina, Uyedineniya (Privacy) islands, archipelago of Sergei Kirov and others.

KEYWORDS: banks and shallows, submarine permafrost, mean annual temperature of bottom water and bottom sediments, fast ice layer, coastal-marine sedimentation, stamukhas

ВВЕДЕНИЕ

Многолетнемёрзлые породы (ММП) на шельфе арктических морей формируются в периоды ледниковый (криохронов) и гляциоэвстатических регрессий моря, деградируют – в периоды межледниковый (термохронов) и гляциоэвстатических трансгрессий. Сейчас, в голоценовое межледниковье, единственным местом, где наряду с деградацией ММП идут процессы их формирования, является береговая зона.

Берега морей Лаптевых и Восточно-Сибирского на одних участках отличает быстрое отступление, на других – их наращивание. Сравнение разновременных аэро- и космических снимков на Ляховские острова и южный берег пролива Дмитрия Лаптева показывает, что с 1951–2000 годов под действием термоабразии и термоденудации было размыто 37,5 км² площади острова Большого Ляховского и 19,0 км² материкового побережья. Скорости отступления составляли в среднем для отступающих берегов этого региона 3,2 м/год за период до 2000 года и 6,4 м/год за последние полтора десятилетия [Пижанкова, Добрынина, 2010;

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geology, Leninskie Gory, 1, 119991, Moscow, Russia,
e-mail: gavrilov@bk.ru

² Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geology, Leninskie Gory, 1, 119991, Moscow, Russia,
e-mail: pijankova@yandex.ru

Пижанкова, 2016]. В результате отступления берегов субэральные толщи мёрзлых льдистых отложений переходят в субмаринные, что даёт начало их деградации. Она происходит снизу под действием геотермического потока и сверху под действием термических и гидродинамических процессов.

Прибрежно-морское осадконакопление на подводном береговом склоне получает развитие на участках положительных вертикальных неотектонических движений, а также там, где геометрия береговой линии обуславливает прекращение перемещения наносов или их избыточное поступление в береговую зону. Повышающееся по мере накопления осадков дно моря становится объектом сначала сезонного, а потом и многолетнего промерзания пород.

Приуроченность разнонаправленной криогенной динамики исключительно к береговой зоне стала нарушаться в начале XXI века. Подобные процессы стали фиксироваться на мелководьях несмотря на то, что подводные возвышенности обычно являются областью размыва.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Район исследований охватывает акваторию наиболее континентальных шельфовых морей Лаптевых и Восточно-Сибирского (западную часть последнего), а также холодную северо-восточную часть Карского моря (рис. 1). Для исследований использовались космические снимки, топографические карты масштаба 1: 200 000, результаты математического моделирования деградации ММП, сформировавшихся в криохроны среднего и позднего плейстоцена [Романовский и др., 2006; Гаврилов, 2013], исторические данные [История..., 1954]. Для изучения динамики берегов использовалось совмещение разновременных дистанционных данных (космоснимков Landsat и архивных аэрофотоснимков) с помощью программного пакета ScanEx Image Processor. Измерение величин приращения берегов и дешифрирование ландшафтов проводилось в ГИС-среде MapInfo Professional. Данные о ледовитости и климатические характеристики были получены из электронных архивов ААНИИ (<http://www.aari.nw.ru/projects/ECIMO/>) и ВНИИГМИ-МЦД (<http://aisori.meteo.ru/ClimateR>).

Рис.1. Район исследований

Fig.1. Research area

Криогенез донных отложений в береговой зоне и на мелководьях

Среднегодовую температуру придонной воды и донных пород береговой зоны и, соответственно, их криогенез определяют процессы в зоне припая (полосы с глубинами моря от 0 до 2–2,5 м, где сезонный лёд смерзается с дном (рис. 2)) и летними температурами воздуха. В полосе припая через смерзающийся с дном лёд осуществляется глубокое кондуктивное выхолаживание донных пород и их сильное сезонное засоление. Выхолаживание настолько значительно, что среднегодовые температуры субмаринных ММП близ уреза являются почти столь же низкими, как и температуры субаэральных мёрзлых пород ($-10 \dots -12$ °С [Катасонов, Пудов, 1972]). На изобатах 2–2,5 м среднегодовая температура придонной воды и пород близка к 0 °С.

В интервале изобат от 2–2,5 до 6–8 м в 1970–80 годах в море Лаптевых среднегодовая температура придонной воды и пород была положительна в связи с летним прогревом воды до 10–15 °С [Жигарев, Плахт, 1974]. В условиях современного потепления зона положительной температуры воды в этом море увеличилась до изобаты 10 м [Dmitrenko et al., 2011]. Зависимость температуры придонной воды от температуры воздуха очень сильная (рис. 3). В 1963–66 годах среднегодовая температура придонной воды в бухте Тикси была на 0,2–0,9 °С ниже, чем в потепление 30–40-х годов XX века [Молочушкин, 1969; География..., 1949]. Осреднение температуры придонной воды за 1900–2009 годы даёт значение, не превышающее 0 °С [Dmitrenko et al., 2011]. Соответственно, в начале XIX века, когда участники Великой Северной экспедиции были вынуждены пересекать пролив Дмитрия Лаптева по льду [История..., 1954], указанные значения были отрицательными.

Рис. 2. Взаимоотношение между глубинами моря, ледовыми явлениями и мёрзлыми породами в береговой зоне
[по Жигареву, Плахту, 1974 с изменениями]

Fig. 2. The relationship between the depths of the sea, ice phenomena and submarine permafrost in the coastal zone
[according to Zhigarev and Plakht, 1974 with changes]

Рис. 3. Соотношение между среднегодовыми температурами придонной воды и воздуха на акватории и побережье морей Лаптевых и Восточно-Сибирского [Григорьев, Разумов, 2005]

Fig. 3. The relationship between the average annual bottom water and air on the waters and the coastal zone of the Laptev and East Siberian seas [Grigoriev, Razumov, 2005]

Рис. 4. Средняя летняя температура воды в придонном слое арктических морей России [Атлас..., 2015]

Fig. 4. Average summer temperature of the bottom water in the Arctic seas of Russia [Atlas ..., 2015]

В случае осадконакопления поверхность аккумуляции, попадая в интервал глубин моря менее 2–2,5 м, становится объектом сезонного промерзания пород, осуществляемого через припайный морской лёд. Дальнейшее осадконакопление приводит к формированию сначала перелетков, а позже – и ММП. При этом увеличение мощности слоя, переходящего в многолетнемёрзлое состояние, происходит как сверху за счёт осадконакопления, так и снизу за счёт кондуктивного охлаждения через уже промерзшие осадки. Формирование и синкриогенное промерзание прибрежно-морских осадков тесно связаны с минерализацией поровых растворов, интервалами глубин моря и наличием (или отсутствием) слоя морской воды под морским льдом. Таким образом, интервалы изобат от 0 до 2–2,5 м и от 2–2,5 до 7–10 м имеют важнейшее значение в формировании температурного режима донных пород и их криогенеза.

Моря Восточно-Сибирского сектора являются мелководными, хорошо прогреваемыми летом (рис. 4). Содержание рисунка показывает обширность прогреваемых площадей моря Лаптевых и особенно западной части Восточно-Сибирского моря. В отличие от этих морей, рельеф дна восточной части Карского моря весьма контрастный, изобилующий подводными и островными возвышенностями. Однако их площади существенно меньше площадей осреднения гидрографических показателей, поэтому на рис. 2 они не видны. Летний прогрев придонной воды приводит к глубокому протаиванию донных осадков, которые в результате этого приобретают подвижность.

Современное потепление Морской Арктики

В арктических морях современное потепление усиливается обратными связями. Особую роль играет деградация морских льдов, уменьшающая альбедо. По данным Росгидромета по сравнению с 1965–1975 годами в Восточно-Сибирском море ледовитость сократилась на 31 %, а продолжительность ледового периода – на 40 суток. Среднегодовая температура придонной воды и донных отложений на изобатах 2...10 м повысилась до положительных значений (+0,2...0,3 °C [Dmitrenko et al., 2011]). Исключением явилась температура в зоне припая (изобаты 0–2 м), где лёд смерзается с дном, обеспечивая выхолаживание донных осадков и сохранение в их толще температуры -10...-12 °C и ниже [Катасонов, Пудов, 1972].

Потепление, увеличивая скорость отступления берегов [Пижанкова, 2016] и мощность оттаивающей части толщи донных ММП сверху, увеличивает объём поступающего на подводный береговой склон дисперсного материала, способного к перемещению, значительная часть которого расходуется на аккумуляцию.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Процесс разрушения островов-реликтов ледового комплекса (ЛК) позднего плейстоцена, объёмная льдистость которого составляла 70–95 %, и размыва банок на месте их бывшего существования продолжался тысячелетиями [Гаврилов и др., 2003; Дударев, 2016]. Историческими данными он зафиксирован в пределах морей Лаптевых и Восточно-Сибирского на протяжении веков. Достаточно упомянуть сведения из книги голландца Н. Витзена «Noord en Oost Tattarye», изданной в 1692 и 1705 годах. В ней говорится об обилии мелей на пути от мыса Буорхая на север к острову, располагавшемуся в то время «напротив устья р. Лена» [История..., 1954]. Предположительно это был один из островов-реликтов ледового комплекса позднего плейстоцена [Гаврилов и др., 2003]. Осадка кочей – судов русских мореплавателей XV–XVIII веков – составляла 2 м. Наименьшие глубины сейчас там составляют 10–15 м. Средняя скорость углубления дна, определённая по этим данным, составляет 3,3 см/год. Многократно подтверждённая глубина банки на месте острова Диомида в проливе Дмитрия Лаптева, также слагавшегося ЛК и существовавшего ещё в 1761 году, составляет 7,4 м, а средняя скорость углубления – 4,3 см/год [там же]. Таким образом, в течение многих веков банки на месте исчезнувших островов-реликтов ЛК на мелководьях размывались, и средние скорости увеличения глубин моря в их пределах составляли 3–4 см/год.

Однако с начала 2000-х годов по результатам мониторинга [Дударев, 2016] выявляется стабилизация глубин моря на Семёновской и Васильевской банках. Более того, в 2013–2014 годах на месте вершины Васильевской банки неоднократно фиксируется осушенная песчаная поверхность. Летом 2014 года гидрографической экспедицией на этом месте был осмотрен островок размерами около 500 м² и высотой над уровнем моря 1 м. Остров был назван Яя [Гуков, 2014] (рис. 5).

Аэрокосмический мониторинг Семёновской и Васильевской банок показывает, что эпицентры мутности приурочены к их вершинным поверхностям [Дударев, 2016]. Это обстоятельство и образование острова Яя свидетельствуют о том, что в пределах этих поверхностей есть участки размыва и участки осадконакопления.

Рис. 5. Остров Яя, появившийся на месте Васильевской банки и обнаруженный в 2013 году.

Фото П. Саяпина (<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=30168239>)

Fig. 5. The island Yaya, appeared on the site of the Vasilievskaya Bank and discovered in 2013.

Photo by P. Sayapin (<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=30168239>)

Недавно стали обозначаться на топографических картах остров Затопляемый в 112 км к востоку от дельты реки Лены, острова Неизвестные у юго-восточного ограничения Земли Бунге. Таким образом, в настоящее время наблюдается современная активизация осадконакопления на мелководьях. Механизм формирования островов дискутируется. Наиболее вероятным и согласующимся с имеющимися данными, по нашему мнению, является участие в их образовании гидродинамических процессов, бульдозерного перемещения осадков дрейфующим льдом, а также воздействие торосистых льдов – стамух (рис. 6) и промерзания донных пород в зоне припая. За три десятка лет визуальной ледовой авиационной разведки

в море Лаптевых по неполным данным обнаружено 2086 стамух, а в Восточно-Сибирском море – 7962 [Горбунов и др., 2007; 2008].

Бульдозерное перемещение осадков под напором дрейфующих льдов осуществляется при сильных прижимных ветрах. Создающиеся протяжённые валы высотой до 10 м под действием ветра передвигаются вверх по склону, срезая и увлекая за собой донные осадки (Reimnitz et al., 1990). При образовании стамух торосы выпаживают дно на многие метры и могут частично погребаться [Хименков, Брушков, 2003]. Погребённые льды облекаются осадками. Под действием бульдозерных надвигов в сочетании с гидродинамическими процессами на положительных морфоструктурах подобные образования могут превращаться в острова. Погребённый лёд в потепления вытаивает, в середине острова образуется лагуна.

Рис. 6. Зоны распространения стамух в морях Российской Арктики [Атлас..., 2015]
Fig. 6. Zones of stamukhas distribution in the seas of the Russian Arctic [Atlas ..., 2015]

Промерзание играет ключевую роль в процессе осадконакопления в интервале изобат, отвечающих зоне припая, и формировании подобных островов (рис. 2). Низкие среднегодовые температуры на глубинах, близких к урезу, и в надводном положении ($-10...-12\text{ }^{\circ}\text{C}$) обеспечивают их долговременное существование. Промерзание облегчается тем, что донные осадки на месте залегания стамух после их стаивания бывают незасолёнными.

Интервал глубин от 2 до 7–10 м также играет важную роль. В условиях современного потепления придонная вода здесь имеет положительные температуры даже в высоких широтах. Они обуславливают существование свободно перемещаемых волнением талых и сезонно оттаивающих осадков. Этот интервал глубин в пределах подводных возвышенностей является основным поставщиком терригенного материала для наращивания высот их вершин и формирования островов. Ниже глубин $-7...-10\text{ м}$ формируются отрицательные среднегодовое температуры придонной воды и донных пород.

Смена углубления моря осадконакоплением тесно связана с увеличением масштаба современного потепления. В 1970–1980 годах температуры придонной воды и донных пород на $74\text{--}75^{\circ}\text{ с.ш.}$ на изобатах 2–3 м были отрицательные, а в 1990–2000 годах они перешли в положительный диапазон. Возникло сезонное оттаивание донных отложений. Более того, удлинение безлёдного сезона увеличило вклад высоких летних температур в формирование среднегодовой температуры придонной воды и донных пород. Потепление обуславливает увеличение объёма взвеси и более крупного осадочного материала в результате увеличения скорости отступления берегов, нарастания глубин сезонного оттаивания пород и усиления абразии дна. Увеличиваются продолжительность безлёдного времени, длина разгона волн, повторяемость и сила штормов и нагонов. Масштабное увеличение объёма терригенного

материала, волновой энергии и присутствие стамух вплоть до ледостава приводят к аккумуляции осадков по их периметру. Промерзание накопленных осадков в первую же зиму консервирует образовавшиеся острова.

Осадконакопление и формирование островов на мелководьях имело место также в прошлом. На топографических картах 1950–1980-х годов отражено несколько островов кольцеобразной формы. Это острова Песчаный и Наносный. Не отрицается также возможность подобного формирования серповидных островов Аэросъёмки и Самолёта северо-западнее дельты реки Лены. Форма атолла или кольца является весьма необычной для островов арктических морей. Возможность их формирования по описанному выше сценарию представляется достаточно реалистичной.

Большое количество островов кольцеобразной формы свойственно также холодной северо-восточной части Карского моря, где среднемноголетние температуры субэкранных пород составляют $-9...-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ и ниже [Геокриологическая карта..., 1996]. В основном это острова, к которым причленены аккумулятивные косы в виде дуги или кольца, например Свердруп (рис. 7), Воронина, Уединения, Старокадомского, Сибирякова и другие. Остров Северный в архипелаге Сергея Кирова состоит из двух колец (рис. 7). Острова Карского и Лаптевоморского шельфа приурочены к положительным морфоструктурам.

Рис. 7. Острова Свердруп (слева)
и Северный (архипелаг Сергея Кирова, справа)
Fig. 7. The islands Sverdrup (on left)
and the Severnyy (Northern, archipelago of Sergey Kirov, on right)

Рис. 8. Картограмма островов кольцеобразной формы шельфовых морей Карского, Лаптевых, Восточно-Сибирского
 Fig. 8. Cartographic scheme of the ring-shaped islands of the shelf seas Kara, Laptev, East Siberian

Многие острова Карского моря представляют собой куполообразные своды, сложенные прочными коренными породами [Романенко, 1998]. Образующиеся при их разрушении и волнении в береговой зоне галечники в условиях существования цепочек и одиночных стамух, глубоко «сидящих» на подводных береговых валах, не переносятся на большие расстояния и могут перекрывать остатки этих ледяных образований. В холодные сезоны крупнообломочные осадки могут просто опоясывать стамухи. Последние позже вытаивают, оставляя после себя лагуны (рис. 7).

Распространение островов кольцеобразной и дугообразной формы показано на картограмме (рис. 8).

ВЫВОДЫ

1. На банках и мелководьях морей Лаптевых и Восточно-Сибирского, размываемых в течение многих веков, в начале XXI столетия фиксируется осадконакопление с образованием островов. Согласно имеющимся данным, оно тесно связано современным потеплением.

2. Эффект от потепления в высокоширотных арктических морях особенно значителен, поскольку усиливается обратными связями. Особую роль играет деградация морских льдов, уменьшающая альбедо. По сравнению с 1965–1975 годами в Восточно-Сибирском море ледовитость сократилась на 31 %, а продолжительность ледового периода – на 40 суток. Среднегодовая температура придонной воды и донных отложений на изобатах 2...10 м повысилась до положительных значений (+0,2...+0,3 °C).

3. Активизация в таких условиях сезонного и многолетнего оттаивания донных отложений, отступления берегов под действием термоабразии и термоденудации продуцирует большое количество талых и оттаивающих осадков, способных к перемещению и аккумуляции. Последнее реализуется в образовании островов.

4. В формировании островов помимо гидродинамических задействованы ледовые и мерзлотные процессы. Среди ледовых большое значение имеет бульдозерное перемещение льдами донных осадков к вершинам положительных морфоструктур. В образовании

островов кольцевой формы предполагается участие погребяемых остатков стамух или сами стамухи. Промерзание обеспечивает долговременное существование островов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Атлас гидрометеорологических и ледовых условий морей российской Арктики: обобщение фондовых материалов и результаты экспедиционных исследований ООО «Арктический научно-проектный центр шельфовых разработок» в 2012–2014 гг. М.: Нефтяное хозяйство, 2015. 128 с.
2. Гаврилов А.В., Романовский Н.Н., Хуббертен Х.-В., Романовский В.Е. Распространение островов – реликтов ледового комплекса – на Восточно-Сибирском арктическом шельфе. Криосфера Земли, 2003. Т. VII. № 1. С. 18–32.
3. Гаврилов А.В. История развития арктического шельфа и картографирование субмаринной криолитозоны. Геокриологическое картографирование: проблемы и перспективы [электронный ресурс № 0321302405]: тезисы конференции, Москва, Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, геологич. ф-т, географ. ф-т, 5–6 июня 2013 г. М.: ИПК РУДН, 2013. С. 144–146.
4. География морей Советской Арктики. Труды Аркт. и Антаркт. НИИ. Т. 8. Вып. 2: Море Лаптевых. М.–Л.: Изд-во Главсевморпути, 1949. 484 с.
5. Геокриологическая карта СССР масштаба 1:2 500 00 (ред. Э.Д. Ершов). М.: МГУ, Геологический ф-т, 1996. 16 л.
6. Горбунов Ю.А., Лосев С.М., Дымент Л.Н. Стамухи Восточно-Сибирского и Чукотского морей. Материалы гляциологических исследований, 2007. Вып. 102. С. 41–47.
7. Горбунов Ю.А., Лосев С.М., Дымент Л.Н. Стамухи моря Лаптевых. Проблемы Арктики и Антарктики, 2008. № 2 (79). С. 111–116.
8. Григорьев М.Н., Разумов С.О. Распространение и эволюция субаквальной мерзлоты в прибрежно-шельфовой зоне морей Лаптевых и Восточно-Сибирского как следствие многолетней трансформации береговой зоны. Современная геодинамика и опасные природные процессы в Центральной Азии. Иркутск: Изд-во Института земной коры СО РАН, 2005. Вып. 2. С. 136–155.
9. Гуков А.Ю. Возрождение острова Васильевского. Природа, 2014. № 5. С. 70–73.
10. Дударев О.В. Современный литоморфогенез на Восточно-Арктическом шельфе. Автореф. дисс... д.г.-м.н. Владивосток, 2016. 49 с.
11. Жигарев Л.А., Плахт И.Р. Особенности строения, распространения и формирования субаквальной криогенной толщи. Проблемы криолитологии. М.: Издательство МГУ, 1974. Вып. IV. С. 115–124.
12. История открытия и освоения Северного морского пути. М.: Морской транспорт, 1954. Т. 1. 592 с.
13. Катасонов Е.М., Пудов Г.Г. Криолитологические исследования в районе Ванькиной губы моря Лаптевых. Мерзлотные исследования. М.: Изд-во МГУ, 1972. Вып. XII. С. 130–136.
14. Молочушкин Е.Н. О характере теплообмена воды и донных пород в прибрежной зоне моря Лаптевых. Вопросы географии Якутии. Якутск, 1969. Вып. 5. С. 121–126.
15. Пижанкова Е.И. Современные изменения климата высоких широт и их влияние на динамику берегов района пролива Дмитрия Лаптева. Криосфера Земли, 2016. Т. XX. № 1. С. 51–64.
16. Пижанкова Е.И., Добрынина М.С. Динамика побережья Ляховских островов (результаты дешифрирования аэрокосмических снимков). Криосфера Земли, 2010. Т. XVI. № 4. С. 66–79.
17. Романенко Ф.А. Строение и динамика рельефа островов Карского моря. Динамика

Арктических побережий России. М.: Географический ф-т МГУ, 1998. С. 131–153.

18. Романовский Н.Н., Елисеева А.А., Гаврилов А.В., Тупенко Г.С., Хуббертен Х.В. Многолетняя динамика толщ мёрзлых пород и зоны стабильности газовых гидратов в рифтовых структурах Арктического шельфа Восточной Сибири (Сообщение 2). Результаты численного моделирования. Криосфера Земли, 2006. Т. X. № 1. С. 29–38.

19. Хименков А.Н., Брушков А.В. Океанический криолитолиз. М.: Наука, 2003. 336 с.

20. Dmitrenko I.A., Kirillov S.A., Tremblay L.B., Kassens H., Anisimov O.A., Lavrov S.A., Razumov S.O., Grigoriev M.N. Recent changes in shelf hydrography in the Siberian Arctic: Potential for subsea permafrost instability. Journal of geophysical research, 2011. V. 116. C10027. DOI: 10.1029/2011JC007218.

21. Reimnitz E., Barnes P.W., Harper J.R. A review of beach nourishment from ice transport of shoreface materials, Beaufort Sea, Alaska. Journal of Coastal Research, 1990. V. 6 (2). P. 439–470.

REFERENCES

1. Atlas of hydrometeorological and ice conditions of the seas of the Russian Arctic: generalization of stock materials and the results of the expeditionary research of LLC “Arctic Research and Design Center for Shelf Development” in 2012–2014. Moscow: Oil industry, 2015. 128 p. (in Russian).

2. Dmitrenko I.A., Kirillov S.A., Tremblay L.B., Kassens H., Anisimov O.A., Lavrov S.A., Razumov S.O., Grigoriev M.N. Recent changes in shelf hydrography in the Siberian Arctic: Potential for subsea permafrost instability. Journal of geophysical research, 2011. V. 116. C10027. DOI: 10.1029/2011JC007218.

3. Dudarev O.V. Modern litomorphogenesis on the East Arctic shelf. Abstract of dissert. for the degree of doct. of geolog. and mineralog. sci. Vladivostok, 2016. 49 p. (in Russian).

4. Gavrilov A.V. The history of the development of the Arctic shelf and mapping of submarine cryolithozone. Geocryological mapping: problems and perspectives [electronic resource No 0321302405]: conference abstracts, Moscow, Moscow State University, Faculty of Geology, Faculty of Geography, June 5–6, 2013. Moscow: IPK PFUR, 2013. P. 144–146 (in Russian).

5. Gavrilov A.V., Romanovsky N.N., Hubberten H.-V., Romanovsky V.E. The distribution of islands – relics of the ice complex – on the East Siberian Arctic shelf. Earth’s Cryosphere, 2003. V. VII. No 1. P. 18–32 (in Russian).

6. Geocryological map of the USSR in scale 1: 2 500 00 (ed. by E.D. Ershov). Moscow: Moscow State University, Faculty of Geology, 1996. 16 p. (in Russian).

7. Geography of the seas of the Soviet Arctic. Proceedings of the Arctic and Antarctic SRI. V. 8. Iss. 2: Laptev Sea. Moscow – Leningrad: Glavsevmorput Publishing House, 1949. 484 p. (in Russian).

8. Gorbunov Yu.A., Losev S.M., Dyment L.N. Stamukhas of the East Siberian and Chukchi Seas. Materials of glaciological research, 2007. V. 102. P. 41–47 (in Russian).

9. Gorbunov Yu.A., Losev S.M., Dyment L.N. Stamukhas of the Laptev Sea. Problems of Arctic and Antarctic, 2008. No 2 (79). P. 111–116 (in Russian).

10. Grigoriev M.N., Razumov S.O. Distribution and evolution of subaquatic permafrost in the coastal-shelf zone of the Laptev and East-Siberian seas as a consequence of long-term transformation of the coastal zone. Modern geodynamics and dangerous natural processes in Central Asia. Irkutsk: Publishing House of the Institute of the Earth’s Crust, SB RAS, 2005. Iss. 2. P. 136–155 (in Russian).

11. Gukov A.Yu. Revival of Vasilyevsky Island. Nature, 2014. No 5. P. 70–73 (in Russian).

12. History of discovery and development of the Northern Sea Route. Moscow: Maritime transport, 1954. V. 1. 592 p. (in Russian).

13. Katasonov E.M., Pudov G.G. Cryolitological studies in the Vankina Bay area of the Laptev Sea. Permafrost Studies. Moscow: Moscow University Press, 1972. Iss. XII. P. 130–136 (in Russian).

14. *Khimenkov A.N., Brushkov A.V.* Oceanic cryolithogenesis. Moscow: Science, 2003. 336 p. (in Russian).
 15. *Molochushkin E.N.* About the nature of heat exchange of water and bottom rocks in the coastal zone of the Laptev Sea. Questions of the geography of Yakutia. Yakutsk, 1969. V. 5. P. 121–126 (in Russian).
 16. *Pizhankova E.I.* Modern climate changes of high latitudes and their influence on the dynamics of the shores of the Dmitriy Laptev Strait area. Earth's Cryosphere, 2016. V. XX. No 1. P. 51–64 (in Russian).
 17. *Pizhankova E.I., Dobrynina M.S.* Dynamics of the Lyakhovsky islands coastline (results of the interpretation of aerospace images). Earth's Cryosphere, 2010. V. XVI. No 4. P. 66–79 (in Russian).
 18. *Reimnitz E., Barnes P.W., Harper J.R.* A review of beach nourishment from ice transport of shoreface materials, Beafort Sea, Alaska. Journal of Coastal Research, 1990. V. 6 (2). P. 439–470.
 19. *Romanenko F.A.* Structure and dynamics of the relief of the Kara Sea islands. Dynamics of the Arctic coasts of Russia. Moscow: Geographical Faculty of Moscow State University, 1998. P. 131–153 (in Russian).
 20. *Romanovsky N.N., Eliseeva A.A., Gavrilov A.V., Tipenko G.S., Hubberten Kh.V.* The long-term dynamics of the permafrost and gas hydrate stability zone on rifts of the East Siberian Arctic shelf (Report 2). Results of numerical simulation. Earth's Cryosphere, 2006. V. X. No 1. P. 29–38 (in Russian).
 21. *Zhigarev L.A., Plakht I.R.* Features of the structure, distribution and formation of subaquatic cryogenic stratum. Problems of cryolithology. Moscow: Moscow University Press, 1974. Iss. IV. P. 115–124 (in Russian).
-