

УДК 551.351.2/551.422

А.В. Гаврилов¹, Е.И. Пижанкова²

РОЛЬ КРИОГЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В ОСАДКОНАКОПЛЕНИИ НА МЕЛКОВОДЬЯХ МОРЯ ЛАПТЕВЫХ

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»,
119991, Москва, ГСП-1, Ленинские Горы, 1

Lomonosov Moscow State University, 119991, Moscow, GSP-1, Leninskiye Gory, 1

Выявлена активизация современного осадконакопления на мелководьях моря Лаптевых, подвергавшихся в прошлом исключительно размыву, оно происходит на фоне повышения уровня моря. В указанной активизации установлена ключевая роль сокращения площади морских льдов, криогенных, а также гидродинамических процессов, инициированная потеплением климата. Осадконакопление, сопровождающееся образованием островов, приурочено к положительным морфоструктурам, испытывающим поднятие.

Ключевые слова: морфолитогенез, осадконакопление, положительные морфоструктуры, современные движения земной коры, современное потепление климата, повышение уровня моря, деградация и новообразование мерзлых пород.

The activation of modern sedimentation on the shallows of the Laptev Sea, which underwent exclusively erosion in the past, has been revealed. It occurs against the background of rising sea levels. In this activation, the key role of reducing the area of sea ice, cryogenic and hydrodynamic processes, initiated by climate warming, was established. Sedimentation, accompanied by the formation of islands, is confined to positive uplift morphostructures.

Key words: morpholithogenesis, sedimentation, positive morphostructures, modern movements of the earth's crust, modern climate warming, sea level rise, permafrost degradation and new formation.

Введение. В сентябре 2013 г. экипажем вертолета (командир А. Матвеев), выполнявшего рейс из пос. Тикси на аэродром Темп на о. Котельный было выявлено, что вершина Васильевской банки (на западе от о-ва Столбовой) в море Лаптевых осушена и возник остров. Образование острова подтверждено аэровизуальными наблюдениями в апреле 2014 г., а 23 сентября 2014 г. на остров высадились участники кругосветной экспедиции исследовательского судна Балтийского флота России «Адмирал Владимирский» [URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Яя_\(остров\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Яя_(остров))]. Его площадь в то время составляла около 0,038 км², высота над уровнем моря <1 м. Остров был назван Яя.

Осадконакопление на мелководьях, которые обычно размываются, — достаточно редкое явление. Необходимость исследований морфолитогенеза в арктических морях обусловлена тем, что шельф в целом и море Лаптевых в частности продолжают оставаться существенно хуже изученными по сравнению с прибрежной сушей. С практической точки зрения актуальность исследований определяется возрастающей хозяйственной значимостью для Российской Федерации Северного морского пути, разведки и освоения ресурсов углеводородов арктического шельфа.

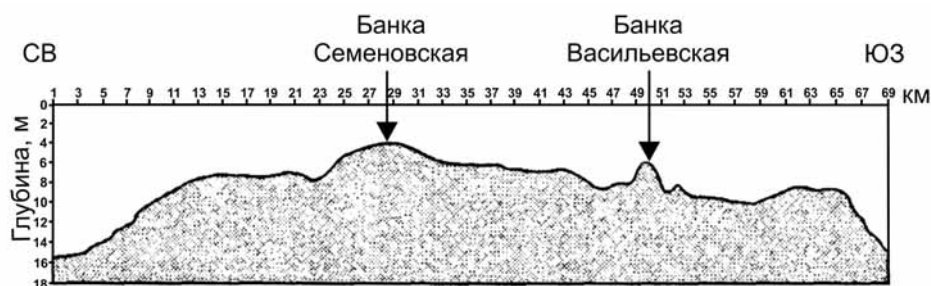
Материалы и методы исследований. Основными материалами были космические снимки (КС) Landsat, Sentinel и Terra/MODIS за 1973–2019 гг. Использованы также тектонические и неотектонические карты, топографические карты масштаба 1:200 000, исторические сведения и геологические карты России масштаба 1:1 000 000 2-го и 3-го поколений, а также разнообразные опубликованные данные, относящиеся к рассматриваемой проблеме. Синтез и совмещение разновременных дистанционных данных, выявление новообразований и взвесей в морской воде осуществлялись с помощью программного пакета ScanEx Image Processor. Измерения для изучения динамики берегов, а также дешифрирование прибрежных ландшафтов проводилось в ГИС-среде MapInfo Professional.

Результаты исследований и их обсуждение. *Мерзлотно-геологическое строение и современная обстановка.* В геолого-структурном отношении шельф моря Лаптевых относится к Хатангско-Лаптевоморской эпикиммерийской платформе. В ее строении выделяются позднемеловой–кайнозойский плитный чехол и фундамент, представленный породами Верхояно-Колымской и Новосибирско-Чукотской складчатых систем [Государственная..., 2014, 2016, 2017]. Площадным распространением

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, лаборатория охраны геологической среды и взаимосвязи поверхностных и подземных вод; вед. науч. с., докт. геол.-минер. н.; e-mail: gavrilov37@bk.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, лаборатория охраны геологической среды и взаимосвязи поверхностных и подземных вод; ст. науч. с., канд. геол.-минер. н.; e-mail: pijanikova@yandex.ru

Рис. 2. Субмеридиональный разрез вдоль осевой части Семеновского мелководья, по [Чаркину и др., 2007]



Современные изменения геологической обстановки на мелководьях. Локальные морфоструктуры шельфа моря Лаптевых и связь с ними криогенных процессов. Среди локальных неотектонических структур, выраженных в рельефе шельфа, выделяются, с одной стороны, поднятия и горсты, а впадины и грабены — с другой (рис. 1). В кайнозойской грабен-рифтовой системе моря Лаптевых отрицательные структуры отвечают грабенам, положительные — горстам.

В последнем криохроне шельф морей Лаптевых и Восточно-Сибирского, а также приморские арктические низменности были перекрыты мощной (до 50 м) толщей отложений ледового комплекса (ЛК) позднего неоплейстоцена. В силу высокой льдистости (70–95% от объема пород) ЛК был весьма чувствителен к тепловым воздействиям. Поэтому, начиная с конца позднего неоплейстоцена (14–13 тыс. л. н.), в отрицательных морфоструктурах получил развитие озерный термокарст [Романовский и др., 1999]. Он обусловил первоочередное затопление впадин, грабенов и долин в ходе позднеплейстоцен-голоценовой трансгрессии моря. Сложенные ЛК возвышенности горстов разрушались в это время термоабразией и термоденудацией, превращаясь в полуострова, а затем в острова-реликты ЛК [Гаврилов и др., 2003]. Последние из них (о-ва Васильевский и Семеновский, оба на Семеновском мелководье, а также о. Фигурина) прекратили свое существование в 1936, 1951 и 1950 гг. соответственно [Гаккель, 1957]. По другим сведениям, на месте о-ва Фигурина в 1952 г. эхолотированием была обнаружена банка, названная банкой Фигурина [Попов, 1987].

Кроме острова Яя на месте исчезнувших в историческое время островов-реликтов ЛК существует ряд островов, сложенных современными или голоценовыми отложениями. Это о-ва Песчаный, Лейкина (Осушной), Наносный, Затопляемый и др. (рис. 1).

Данные об изменении глубины Семеновской банки. В 1955 г. минимальная глубина Семеновской банки составляла 0,1 м [Клюев и др., 1981; Арэ, 2012]. В 1965 г. вершинная поверхность Семеновского мелководья, включающего Семеновскую и Васильевскую банки, оконтуривалась изобатой 2 м. В осевой линии мелководья глубина составляла 1,2 м, а минимальная на Васильевской и Семеновской банках — 0,8 м [Клюев и

др., 1981; Семенов, 1971]. Тепловые просадки и размыв Семеновской банки (в соответствии с навигационными картами 1969–1971 гг.) привели к ее углублению на 2–5 м [Арэ, 2012]. Детальный мониторинг изменения глубины Семеновской банки (промеры с бортов низкосидящих судов в 1999, 2000, 2003–2006 гг.) дал возможность охарактеризовать динамику ее рельефа [Чаркин и др., 2007]. Наименьшая глубина Семеновской банки в начале 2000-х гг. по этим данным составила 4,2 м на фоне глубины, изменяющейся от 5,5 до 8,6 м и глубже (рис. 2). В более поздних публикациях [Чаркин и др., 2015; Дударев, 2016] приводится существенно меньшая минимальная глубина Семеновской банки — 0,8–1 м.

Данные о морфолитогенезе на мелководьях, полученные с помощью КС. Разновременные космические снимки дают возможность осуществлять ретроспективный мониторинг динамики мелководий. Так, по данным Terra/MODIS мель на вершине Васильевской банки наблюдалась по обрушению волн (бурунам) уже в 2003–2005 гг. С конца октября 2003 г. на этой мели практически ежегодно формируется стамуха. Несмотря на трудности определения истинных размеров низменных островов, вследствие существования сгонно-нагонных явлений для многих этих островов зафиксировано изменение очертаний и нарастание площади. Использование разносезонных КС Landsat, Sentinel и MODIS за 1973–2018 гг. позволило выявить ряд банок. Они дешифрируются по приуроченности к ним стамух и торосов в периоды ледостава и разрушения сезонного льда, а в безледный сезон — по наличию над ними полей взвеси или бурунов (при ветре). Таковы отмели на Семеновском мелководье, на мелководье Нерпа, на безымянных мелководьях к северо-востоку от дельты Лены, а также банка Опасная [Кучейко, 2020]. При ветровых сгонах банки могут обнажаться. О. Затопляемый на банке Вест (в 117 км на восток от дельты Лены и в 133 км на север от мыса Буор-Хая) и о. Лейкина (Осушной) (в 80 км на северо-восток от п-ова Терпья-Тумса) также относятся к образованиям, обнажающимся при сгонах и затопляемым при нагонах.

Сопоставление серии снимков Landsat позволило зарегистрировать изменение конфигурации, размеров и площади о-ва Наносный с 1999 по 2019 г. Остров расположен в 33 км на восток-

Таблица 1

Динамика о. Наносный по результатам измерений на КС Landsat -7, -8

Остров	Географическое положение	Морфология	Дата съемки	Длина береговой линии, км	Площадь, км ²	Длина, км	Ширина, км
Наносный	33 км на северо-восток от о. Котельный, 25,5 км на северо-запад от о. Железнякова	Остров представляет собой полукольцо правильной формы, выпуклое к западу, высота не более 2 м	13.07.1999	6,0	0,75	2,9	0,23–0,34
			25.08.2000	6,9	0,76	3,3	0,22–0,36
			20.08.2002	7,1	0,84	3,2	0,18–0,49
			15.08.2011	7,4	0,89	3,3	0,2–0,44
			13.08.2014	8,7	1,22	3,6	0,2–0,63
			04.08.2018 (нагон)	7,7	0,76	3,5	0,16–0,35
			08.08.2018	10,0	1,31	4,2	0,2–0,74
			11.08.2018 (сгон)	11,4	2,4	5,2	0,2–1,1
			19.07.2019 (нагон)	8,1	0,86	3,7	0,16–0,42
			04.08.2019	10,6	1,46	4,3	0,16–0,9
22.08.2019 (сгон)	11,0	2,0	4,8	0,2–0,9			

северо-восток от мыса Анисий о-ва Котельный. Он сформировался на месте разрушенного термоабразией в 1950 г. о-ва Фигурина, слагавшегося породами ледового комплекса [Гаккель, 1957]. На КС Landsat за разные годы фиксируется изменение очертаний и параметров острова, сильно зависящее от приуроченности времени съемки к явлениям сгонов либо нагонов (таблица), тем не менее для него установлено нарастание площади и длины, что особенно выражено в последние годы.

Ряд островов, включая Наносный, смещается в восточном направлении. Смещение происходит в связи с доминированием в безледный сезон западных ветров. В результате ветровых течений продукты размыва с западных отступающих берегов переносятся на восток, где они формируют примыкающие к островам косы. За последние 18 лет отступление 1,5-километрового участка западного берега о-ва Наносный составило в среднем 55 м при максимальном 100–120 м. Средняя скорость перемещения с запада на восток, таким образом, составила около 3 м/год.

Вертикальные движения земной коры. Повышение поверхности (и/или нарастание площади), обнаруженное с помощью КС у островов Яя и Наносный, наблюдается в условиях повышения уровня моря. Во второй половине XX в. оно оценивалось в 1,7, в 1993–2010 г. — в 3,2 мм/год [МГЭИК..., 2014]. Поэтому участки мелководий с новообразующимися островами должны испытывать положительные движения, соответствующие указанному повышению уровня моря.

Согласно схеме режимов новейших вертикальных движений земной коры арктического шельфа России [Мусатов, 2004] Восточно-Лаптевской зоне поднятий отвечает режим умеренных воздыманий, а горсту, вмещающему Семеновское мелководье, — режим слабых воздыманий.

Мы попытались оценить их потенциально возможный темп. Для района о-ва Наносный, относящегося к Восточно-Лаптевской зоне поднятий (региональная морфоструктура Б), выполнена такая оценка. Котельническое, Ляховское и Чокурдахское поднятия, отделенные друг от друга грабенами проливов Санникова, Этерикан и Дм. Лаптева (рис. 1), характеризуются повышенной тектонической активностью. О современном поднятии в пределах этой зоны может свидетельствовать анализ данных с двух уровнемерных станций: Кигилях и Пролив Санникова. Они расположены на п-ове (мысе) Кигилях о-ва Бол. Ляховский и на юго-западной оконечности о-ва Котельный соответственно. При указанном выше тренде повышения уровня океана (+1,7 и +3,0 мм/год) изменение уровня в проливе Дм. Лаптева по средним показаниям со ст. Кигилях характеризовалось в те же периоды следующими значениями: –0,85 мм/год при тренде +1,7 мм/год во второй половине XX в. и –1,38 мм/год при тренде +3,0 мм/год в 1993–2010 гг. [Меркулов и др., 2017]. Отрицательные значения показаний свидетельствуют о том, что поднимается не только уровень моря, но и берег, где расположена станция, при этом поднятие берега опережает повышение уровня моря. Почти аналогичны данные с станции Пролив Санникова. Во второй половине XX в. скорость поднятия юго-западного берега о-ва Котельный на 0,33 мм/год превосходила скорость повышения уровня океана, а в 1993–2010 гг. — на 0,20 мм/год «не дотягивала» до возросшего темпа поднятия океана.

Данные уровнемерных наблюдений коррелируют с характером современного рельефа в пределах локальных морфоструктур, входящих в состав Восточно-Лаптевской зоны поднятий. Это массивы низких гор с абсолютными отметками 160–450 м, (наивысшая 558 м — г. Харстан в пределах

Чокурдахского поднятия) с плоскими вершинами, отдельными вершинами-тумпами и кигиляхами (скальные останцы высотой до 10–12 м). Долины узкие, находятся в стадии глубинной эрозии, для них характерны резкие прямолинейные изгибы русел. П-ову Кигилях свойственны аномальные врезы овражной сети, висячие долины, речные перехваты [Государственная ..., 2016].

В отличие от района о. Наносный, для Семеновского мелководья и о-ва Яя оценить потенциально возможную скорость вертикальных движений с помощью региональных данных оказалось невозможно. Поэтому мы сочли возможным воспользоваться результатами обобщений, приведенных в работах [Никонов, 1977; 2006; Захаров, 2006] и показывающих, что в пределах платформ скорость современных вертикальных движений варьирует от долей до нескольких миллиметров в год.

По-видимому, темп современного поднятия участка о-ва Наносный превосходит скорость поднятия участка о-ва Яя на Васильевской банке. Этот вывод основан на таких показателях осадконакопления, как его начало, темп нарастания площади и площадь острова в настоящее время. Банки в районах этих островов образовались после практически одновременного разрушения о-вов Фигурина и Васильевского. Однако о. Наносный, сложенный современными песками, обозначен на топографической карте уже в начале 1980 гг., тогда как осадконакопление о. Яя, началось лишь с начала 2000-х гг. Площадь о-ва Наносный (1,31–1,46 км²) превосходит площадь о-ва Яя (0,06 км²). По скорости увеличения площади он также опережает о-в Яя (0,04 км²/год против 0,005 км²/год).

Результаты оценки показывают, что в наблюдаемом сейчас повышении поверхности и увеличении площади островов Наносного и Яя задействованы положительные вертикальные движения земной коры, однако их участие осуществляется в соответствии с геологическим масштабом времени. Поэтому о положительных тектонических движениях, результат которых можно увидеть в течение 30–40 лет, говорить невозможно. Возникает вопрос: с какими факторами может быть связано возникновение островов и расширение их площади?

Роль морских льдов, криогенных и гидродинамических процессов в современном осадконакоплении. По нашему мнению, речь может идти только о современном осадконакоплении. К обуславливающим его факторам относятся сокращение ледовитости, активизация криогенных и гидродинамических процессов, вызванное потеплением климата. Ледовые условия характеризуются отступанием границы многолетних морских льдов на север и увеличением продолжительности безледного, т.е. динамически активного сезона. Коэффициент корреляции этих явлений с значениями летней температуры воздуха составляет 0,92 [Второй...,

2014]. В морях Карском, Лаптевых, Восточно-Сибирском площадь морских льдов в 2005–2014 гг. по сравнению с 1960–1980 гг. сократилась в 5 раз. Отступление границы сезонных льдов к 78–80° с.ш. [Второй..., 2014] и увеличение динамически активного сезона существенно повышают длину разгона волн, повторяемость и силу штормов. Приведенные данные позволяют сделать вывод, что современное потепление и снижение ледовитости морей существенно увеличивает потенциал морфолитогенеза.

Однако указанный потенциал — только возможность проявления осадконакопления. Для его осуществления необходим осадочный материал. При достаточном количестве последнего энергия волн расходуется на перемещение и аккумуляцию, при дефиците — на размыв отложений. Формирование осадочного материала в ходе современного потепления тесно связано с активизацией криогенных процессов. Среди них один из важнейших — деградация толщи мерзлых донных отложений сверху. Она обусловлена повышением среднегодовой температуры придонной воды на мелководьях. Исторические [История..., 1954], палеоклиматические [Наурызбаев и др., 2003] и гидрологические (наблюдения ААНИИ, начавшиеся в 1920-е гг.) данные дают основание утверждать, что в XVIII–XX вв. и вплоть до потепления 1930–1940-х гг. температура придонной воды на прибрежных мелководьях была отрицательной. После холодных 1960-х гг. в 1970-е гг. положительная температура инструментально фиксировалась только в мелководной Ванькиной губе (72° с.ш.) [Жигарев, Плахт, 1974] и вблизи устьев крупных рек [Молочушкин, 1969]. Однако у о-вов Ляховские и Анжу [Соловьев, 1981], в западной части моря Лаптевых и во всех других арктических морях, исключая Баренцево, в эти десятилетия температура воды в береговой зоне была ниже 0 °С [Арэ, 2012].

Температура воздуха заметно начала повышаться в 1980-х гг. Наиболее высокая среднегодовая температура придонной воды на мелководьях зафиксирована в 1999–2009 гг. [Dmitrenko et al., 2011]. В этот период область ее положительных значений на акватории расширилась до 76° с.ш., распространившись также на мелководья в открытом море. Одновременно происходило углубление нижней границы зоны положительной температуры на мелководьях: от 7-метровой изобаты в 1970-х гг. до 10-метровой — в 2000-х гг.

Донные породы, если это не ЛК, обычно засолены. Засоленные дисперсные отложения оттаивают в спектре отрицательных значений температуры. Поэтому нижняя граница оттаивших (охлажденных) пород на мелководьях может находиться глубже изобаты 10 м. Существенно увеличивается также глубина летнего оттаивания в зоне существования припая (изобаты 0–2 м),

где температура замерзания—оттаивания пород вследствие их минерализации приобретает отрицательные значения. Интервал 2–10 м и более с температурой воды выше 0 °С в пределах подводных возвышенностей и подводного берегового склона — один из поставщиков терригенного материала для аккумуляции и формирования островов. Показателем этого процесса служат обширные поля взвеси, фиксируемые на позднелетних (август) космоснимках над Семеновским мелководьем, банками Опасная, Нерпа, Фигурина, а также вдоль побережий. В результате многолетнего оттаивания среднее значение ежегодного понижения кровли мерзлых пород за последние 30 лет варьирует от долей сантиметра до нескольких десятков сантиметров в год [Григорьев, 2017].

Другой поставщик талых осадков — термоабразия и термоденудация берегов. Результаты изучения отступления берегов Ляховских о-вов и южного берега пролива Дм. Лаптева по разновременным аэро- и космическим снимкам показывают, что с 1951 по 2000 г. под действием термоабразии и термоденудации было размыто 37,5 км² площади о. Бол. Ляховский и 19,0 км² материкового побережья. Скорость отступления составляла в среднем 3,2 м/год за период 1951–2000 гг. и 6,4 м/год за 2000–2013 гг. [Пижанкова, Добрынина, 2010; Пижанкова, 2016]. Двукратное ускорение отступления — следствие потепления климата, особенно активизировавшегося с середины 1990-х гг. Этому способствует увеличение продолжительности динамически активного безледного сезона, увеличение длины разгона волн и вероятности возникновения экстремальных штормовых нагонов. В последние три десятилетия в результате отступления берегов и многолетнего оттаивания толщи ММП ежегодно в море Лаптевых поступает 62 млн т осадков [Григорьев, 2017]. Указанное количество талых осадков, способных к перемещению и аккумуляции, весьма существенно. Этим и определяется смена размыва мелководий, происходившего в XVII–XX вв., на режим, когда наряду с выносом осадков в глубоководные части акватории имеет место современное осадконакопление на отмелях.

На Семеновском мелководье, где в районе Васильевской банки сформировался о. Яя, с 2000-х гг. вырабатывается аккумулятивный профиль равновесия. Об этом свидетельствует не только возникновение острова, но и участие наиболее крупной — песчаной — фракции осадков в его построении. Материал же взвесей пелитовой и алевроитовой размерности, как указано выше, увлекается на глубину. Им выстилается поверхность подводной аккумулятивной равнины, окружающей мелководье.

Подобный процесс, по нашему мнению, действует также в районах о. Наносный, других банок и островов моря Лаптевых. На месте прекратившей существование реликтовой банки Фигурина со

второй половины XX в. идет процесс аккумуляции современных песчаных осадков, который сопровождается их синкриогенезом.

Многолетнее сингенетическое промерзание новообразованных островов и банок — другой значимый для современного осадконакопления процесс, осуществляющийся не только в надводных, но и в субмаринных условиях. В последнем случае это происходит в зоне припая (интервал изобат 0–2 м), где сезонный лед смерзается с дном. Через смерзающийся с дном лед происходит глубокое кондуктивное выхолаживание донных пород. Оно настолько значительно, что среднегодовые значения температуры субмаринных ММП вблизи уреза характеризуются столь же низкими значениями, как и субэральные мерзлые породы. В 1970-е гг. в Ванькиной губе (72° с. ш.) они составляли –10...–12 °С [Катасонов, Пудов, 1972]. Многолетнее промерзание способствует консервации новообразованных банок.

В осадконакоплении принимают участие также ледовые процессы, на активность которых потепление не повлияло. Это аккумуляция в результате транспортной деятельности внутриводного и мутного льда, т.е. содержащего большое количество минеральных и органических включений, а также бульдозерное перемещение донных осадков вверх по подводному склону дрейфующими льдами под напором прижимных ветров. Считается, что бульдозерное перемещение — один из основных процессов, способствовавших образованию барьерных островов у берегов Аляски [Barnes et al., 1988; Kempema et al., 1989]. В ряде случаев осадконакопление может происходить в волновой или ветровой тени стамух, а также вокруг последних во время штормов, что произошло, по предположению А.Ю. Гукова [2014], при образовании о-ва Яя.

Торосы и стамухи играют также защитную роль для новообразованных форм рельефа, принимая на себя штормовые волнения и ледовые нагрузки со стороны моря. Образование мощных застамушенных многорядных барьеров, сидящих на глубине 4–5 м вдоль границы припая, происходит осенью и весной во время его формирования и разрушения соответственно [Огородов, 2011].

На застамушенных участках после схода стамух осадки могут быть опреснены, что облегчает их промерзание, если они не были мерзлыми [Жигарев, 1997]. В пределах участков их регулярного ежегодного формирования это обстоятельство способствует стабилизации мерзлого состояния пород, что, безусловно, благоприятствует осадконакоплению.

Выводы. 1. В пределах моря Лаптевых, относящегося к Хатангско-Лаптевоморской платформе, в течение XVII–XX вв. острова-реликты ледового комплекса, а позже банки, сформировавшиеся на их месте, размывались. На рубеже XX и XXI вв. на этих банках начинается осадконакопление с образованием островов.

2. Банки приурочены к локальным положительным морфоструктурам, отвечающим горстам в рифтовой системе моря Лаптевых. Осадконакопление на банках идет на фоне повышения уровня моря со скоростью 3 мм/год в связи с потеплением климата. Наиболее активно накопление осадков происходит в Восточно-Лаптевской зоне. Здесь оно поддерживается современным тектоническим поднятием, темп которого соизмерим со скоростью повышения уровня моря.

3. В пределах плиты Хатангско-Лаптевоморской платформы современное осадконакопление проявлено на Васильевской банке, где в 2013 г. зафиксирован о. Яя. Основную роль в осадконакоплении здесь, а также в Восточно-Лаптевской зоне играют современные ледовые условия, криогенные и гидродинамические процессы.

4. Влияние современных ледовых условий на седиментацию сказывается через отступление границы многолетних морских льдов к северу и рост продолжительности безледного, т.е. динамически активного сезона. Они существенно увеличивают

длину разгона волн и энергетическую мощь волнения.

5. Криогенные процессы, служат основным поставщиком материала для аккумуляции, его объем составляет десятки мегатонн в год. Это оттаявшие и оттаивающие донные породы на изобатах до 10 м и продукты термоабразионного разрушения берегов. В то же время многолетнее промерзание новообразованных банок в интервале изобат 0–2 м и островов способствует их стабилизации на месте образования.

6. Гидродинамические процессы «суммируют» результаты деятельности морского льда и криогенных процессов. Они позволяют вырабатывать на мелководьях аккумулятивный профиль равновесия и представляют собой итоговый морфолитогенетический процесс.

Благодарности. Авторы выражают благодарность А.А. Кучейко за полезную информацию, полученную с космоснимков Sentinel и Terra/MODIS, обсуждение и советы в ходе подготовки статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Арэ Ф.Э. Разрушение берегов арктических приморских низменностей. Новосибирск, Гео, 2012. 291 с.

Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. Росгидромет, 2014. URL: <https://cc.voeikovmgo.ru/gu/publikatsii/2016-03-21-16-23-52>.

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.

Гаккель Я.Я. Наука и освоение Арктики: Л., Морской транспорт, 1957. 132 с.

Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Листы S-51: Оленекский залив, S-52 дельта р. Лены. Объясн. записка. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2014.

Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Листы S-53, 54: о. Столбовой — Ляховские острова. Объясн. записка. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2016.

Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Литологическая карта поверхности дна акватории. Лист S-50 Усть-Оленек. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2017.

Григорьев М.Н. Исследование деградации многолетнемерзлых пород морей Восточной Сибири (по результатам экспедиций 2014–2016 гг.) // Проблемы Арктики и Антарктики. 2017. Вып. 1. С. 89–96. URL: <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2017-0-1-89-96>.

Гуков А.Ю. Возрождение острова Васильевского // Природа. 2014. № 5. С. 70–73.

Жигарев Л.А., Плахт И.Р. Особенности строения, распространения и формирования субаквальной кри-

огенной толщи // Проблемы криолитологии. Вып. IV. М.: Изд-во Моск.ун-та, 1974. С. 115–124.

Дударев О.В., Чаркин А.Н., Шахова Н.Е. и др. Особенности современного морфолитогенеза на шельфе моря Лаптевых: Семёновское мелководье («Земля Васема») // Докл. РАН. 2015. Т. 462, № 2. С. 223–229.

Дударев О.В. Современный литоморфогенез на Восточно-Арктическом шельфе: Автореф. докт. дисс. Владивосток, 2016.

Захаров В.С. Современные вертикальные движения земной коры // Современные глобальные изменения природной среды. Т. 1. М.: Научный мир, 2006. С. 626–643.

История открытия и освоения Северного морского пути. М.: Морской транспорт, 1954. 475 с.

Катасонов Е.М., Пудов Г.Г. Криолитологические исследования в районе Ванькиной губы моря Лаптевых // Мерзлотные исследования. Вып. XII. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1972. С. 130–136.

Клюев Е.В., Котюх А.А., Оленина Н.В. Картографо-гидрографическая интерпретация исчезновения в море Лаптевых островов Семеновского и Васильевского // Изв. Всесоюз. геогр. об-ва. 1981. Вып. 6. С. 485–492.

Кучейко А.А., Иванов А.Ю., Айнов К.В., Лисаченко Е.С. Обнаружение отмелей и малых островов в южной части моря Лаптевых по спутниковым данным // Земля из космоса. 2020. Вып. № 27. С. 50–60.

Лукина Н.В., Патык-Кара Н.Г., Соколов С.Ю. Неотектонические структуры и активные разломы шельфа // Геология и полезные ископаемые шельфов России (атлас) / Гл. ред. М.Н. Алексеев. М.: Научный мир, 2003. 278 с.

МГЭИК, 2014: Изменение климата: Обобщающий доклад. Вклад Рабочих групп I, II и III в Пятый оценочный доклад Межправительственной группы экспертов по изменению климата [основная группа авторов, Р.К. Пачаури и Л.А. Мейер (ред.)]. МГЭИК, Женева, Швейцария, 2014. 163 с.

Меркулов В.А., Ашик И.М., Тимохов Л.А. Тенденции многолетней изменчивости уровня моря на прибрежных станциях Северного Ледовитого океана // Проблемы Арктики и Антарктики. 2017. № 3(113). С. 51–65.

Молочушкин Е.Н. О характере теплообмена воды и донных пород в прибрежной зоне моря Лаптевых // Вопросы географии Якутии. Якутск, 1969. С. 121–126.

Мусатов Е.Е. Неотектоническая структура // Геология и полезные ископаемые России. Т. 5, Арктические и дальневосточные моря. Кн. 1. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2004. 468 с.

Наурузбаев М.М., Ваганов Е.А., Сидорова О.В. Изменчивость приземной температуры воздуха на севере Евразии по данным тысячелетних древесно-кольцевых хронологий // Криосфера Земли. 2003. Т. VII, № 2. С. 84–91.

Никонов А.А. Голоценовые и современные движения земной коры. М.: Наука, 1977. 240 с.

Никонов А.А. Современные движения земной коры. Изд. 2-е, доп. М.: КомКнига, 2006. 192 с.

Огородов С.А. Роль морских льдов в динамике рельефа береговой зоны. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2011. 173 с.

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

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.

Попов С.В. Морские имена Якутии. Очерки по топонимии морей Лаптевых и Восточно-Сибирского. Якутск: Кн. изд-во, 1987. 168 с.

Романовский Н.Н., Гаврилов А.В., Тумской В.Е. и др. Термокарст и его роль в формировании прибрежной

зоны шельфа моря Лаптевых // Криосфера Земли. 1999. Т. III, № 3. С. 79–91.

Семенов Ю.П. Условия образования донных отложений моря Лаптевых // Геология моря. Вып. 1. Л.: Изд-во НИИГА, 1971. С. 47–53.

Соловьев В.А. Прогноз распространения реликтовой субаквальной мерзлой зоны (на примере восточно-арктических морей) // Криолитозона арктического шельфа. Якутск: Изд-во ИМ СО АН СССР, 1981. С. 28–38.

Чаркин А.Н., Дударев О.В., Семилетов И.П., Шило И.Н. Современное состояние реликтовых банок на шельфе морей Восточно-Сибирского региона // Криогенные ресурсы полярных регионов / Мат-лы междунар. конф., Салехард, июнь 2007. Т. 1. Пушино, ОНТИ Пушкинского научного центра РАН, 2007. С. 184–186.

Чаркин А.Н., Дударев О.В., Шахова Н.Е. и др. Особенности формирования полей взвеси в морях Восточной Арктики // Докл. РАН. 2015. Т. 462, № 5. С. 595–600.

Barnes P.W., Rawlinson S.E., Reimnitz E. Coastal geomorphology of Arctic Alaska. A.T. Chen, C.B. Leidersdorf (eds) // Arctic coastal processes and slope protection design // Amer. Soc. Civil Eng. N.Y., 1988. P. 3–30.

Dmitrenko I.A., Kirillov S.A., Bruno Tremblay L. et al. Recent changes in shelf hydrography in the Siberian Arctic: Potential for subsea permafrost instability // J. Geophys. Res.. 2011. Vol. 116. C10027. DOI:10.1029/2011JC007218, 2011

Kempema E.W., Reimnitz E., Barnes P.W. Sea ice sediment entrainment and rafting in the Arctic // J. Sediment. Petrol. 1989. Vol. 59, N 2. P. 308–317.

Википедия — свободная энциклопедия: URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Яя_\(остров\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Яя_(остров)) (дата обращения: 12.11.2019).

Поступила в редакцию 00.00.2020

Поступила с доработки 00.00.2020

Принята к публикации 00.00.2020