

СОСТАВ И СВОЙСТВА ДОННЫХ ОСАДКОВ БУХТ МОРЯ ЛАПТЕВЫХ

COMPOSITION AND PROPERTIES OF BOTTOM SEDIMENTS OF INLETS OF THE LAPTEV SEA

ЗДОБИН Д.Ю.

Ученый секретарь Охотинского общества грунтоведов, к.г.-м.н., г. Санкт-Петербург, zdobin_soil@mail.ru

ВЕРЖБИЦКИЙ В.Е.

Старший научный сотрудник Института океанологии РАН, к.г.-м.н., г. Москва, torsek1@mail.ru

ХУДОЛЕЙ А.К.

Заведующий кафедрой региональной геологии Института наук о Земле Санкт-Петербургского государственного университета, д.г.-м.н., профессор, г. Санкт-Петербург, akhudoley@gmail.com

ТУЧКОВА М.И.

Старший научный сотрудник Геологического института РАН, д.г.-м.н., г. Москва, tuchkova@ginras.ru

РОГОВ М.А.

Старший научный сотрудник Геологического института РАН, к.г.-м.н., г. Москва, russianjurassic@gmail.com

ZDOBIN D.YU.

Academic secretary of the «Okhotin Society of Soil System» regional public scientific organization, PhD (candidate of science in Geology and Mineralogy), St Petersburg, zdobin_soil@mail.ru

VERZHBITSKY V.E.

Senior staff scientist of the Institute of Oceanology of the RAS, PhD (candidate of science in Geology and Mineralogy), Moscow, torsek1@mail.ru

KHUDOLEY A.K.

Head of the Regional Geology Department of the Earth Sciences Institute of St. Petersburg State University, DSc (doctor of science in Geology and Mineralogy), professor, St. Petersburg, akhudoley@gmail.com

TUCHKOVA M.I.

Senior staff scientist of the Geological Institute of the RAS, DSc (doctor of science in Geology and Mineralogy), Moscow, tuchkova@ginras.ru

ROGOV M.A.

Senior staff scientist of the Geological Institute of the RAS, PhD (candidate of science in Geology and Mineralogy), Moscow, russianjurassic@gmail.com

Ключевые слова:

шельф; море Лаптевых; бухты; донные грунты; ил; физико-химические свойства; глинистые минералы; условия седиментации.

Key words:

shelf; Laptev Sea; inlets; bottom soils; silt; physicochemical properties; clay minerals; sedimentation conditions.

Аннотация

В статье впервые подробно рассмотрены условия формирования современных донных отложений бухт Моржовая и Отмелая моря Лаптевых. На основе всестороннего анализа гранулометрического, минерального, химического состава и физико-химических свойств донных илов излагаются представления о современном полярном седиментогенезе в рассматриваемой части шельфа Российской Арктики.

Введение

Донные отложения моря Лаптевых исследованы крайне слабо и неравномерно, чему во многом способствуют его труднодоступность и крайне суровые физико-географические условия (акватория продолжительное время покрыта сплошным ледовым покровом). Ранее проведенные исследования касались в основном изучения гранулометрического и минералогического состава донных отложений и общей картины распределения осадков по Лаптевоморскому шельфу [1, 5]. Детальные работы по изучению глинистых минералов, геохимии осадочного процесса и физико-химических свойств донных осадков не проводились. Именно им, а также комплексному рассмотрению процессов прибрежно-морской седиментации в бухтах моря Лаптевых посвящена данная работа. В качестве примера выбраны современные отложения бухты Моржовая (восточное побережье полуострова Таймыр) и бухты Отмелая (залив Нордвик, междуречье рек Хатанга и Анабара) (рис. 1).

Пробы современных донных осадков отбирались в августе 2008 г. в акватории по профилям «берег — море» специальной прямооточной трубкой (с глубины по воде от 0,5 до 3,0 м и по осадку — до 0,5 м), на суше — из шурфов до максимально возможной глубины (до многолетнемерзлых пород). Всего было опробовано 13 точек наблюдения и проанализировано 56 образцов ненарушенной структуры. В лабораторных условиях проводились минералогические исследования с помощью рентгенофлуоресцентного анализа (РФА), изучение геохимии осадка методом потенциометрии и физико-химических свойств по стандартным грунтоведче-

Abstract

The article for the first time considers in detail the formation conditions of the modern deposits of the Morzhovaya and Otmelaya inlets of the Laptev Sea. Ideas on the modern polar sedimentogenesis in the concerned part of the Russian Arctic shelf are discussed on the basis of comprehensive analysis of the particle size distribution, mineral and chemical composition, physicochemical properties of the bottom silts.



ским методикам. В процессе работ наибольшее внимание уделялось современным алевро-глинистым осадкам как индикаторам полярного литогенеза.

Геологическое строение исследуемого региона

Геологическое строение мыса Цветкова (см. рис. 1) определяется его принадлежностью к зоне сочленения Таймырской складчато-надвиговой системы и Енисей-Хатангского прогиба. Береговые обрывы (активные клифы) побережья моря Лаптевых от мыса Цветкова до устья реки Короткая сложены терригенными породами пермского, триасового и юрского возраста с преимущественно моноклинальным залеганием (углы падения — от 70 до 25°) и разной степенью деформированности. Разрез нарушен малоамплитудными разрывными нарушениями взбросо-надвиговой и сбросовой кинематики. В составе разреза, являющегося опорным для севера Средней Сибири, преобладают песчаники с прослоями конгломератов, встречаются алевролиты и аргиллиты с маломощными линзовидными прослоями углефицированных растительных остатков. Песчаники — кварц-полевошпатовые с редкими прослоями вулканокластических. Породы палеозоя-мезозоя полностью перекрыты неравномерным чехлом четвертичных отложений.

Полуостров Нордвик сложен осадочными породами широкого возрастного диапазона, но на дневную поверхность выходят только отложения девона, триаса, юры и мела. Нижний девон представлен мощной пачкой каменной соли и гипсом с включением доломитов. Каменная соль слагает ядра соляных куполов. Триасовые отложения развиты фрагментарно и представлены песчаником, конгломератом и алевролитом. Породы юрского периода занимают значительную по площади территорию полуострова — всю его северную часть. Спектр пород крайне широк — пески алевритистые, алевриты, песчаники, пелиты и известняки. Активные клифы побережья сложены именно породами юрского периода. Меловые отложения также представлены терригенными породами — алевритами, песками и пелитами. Так же как и на Восточном Таймыре, вышеописанные осадочные породы перекрыты чехлом четвертичных отложений, которые получили наибольшее распространение в кутовых частях залива у мыса Харга и мыса Нордвик (бухта Отмелая).

Бухта Моржовая (75°54,4' с.ш., 112°30,5' в.д.) находится на восточном побережье полуострова Таймыр между мысом Сибирский и мысом Прончищева. Бухта представляет собой вытянутый в субширотном направлении полузамкнутый водоем, отделенный от моря Лаптевых пологой узкой галечной косой (косой Цветкова) длиной 5,1 км (рис. 1, а). Максимальная глубина воды в центре бухты достигает 3,0 м.

Бухта Нордвик вдается в южный берег пролива Восточный между полуостровами Нордвик и Урюнг-Тумус (74°01' с.ш., 111°20' в.д.). Берега этой бухты холмистые, причем на востоке они выше, чем на западе. Склоны прибрежных холмов на востоке и западе обрывистые, южный берег бухты пологий, изрезанный многочисленными заболоченными долинами речек и ручьев. Южный берег бухты окаймлен отмелью глубиной менее 3–4 м, которая местами представлена отделенными узкими подводными косами. Глубины в бухте Нордвик небольшие (в центральной части — 6–9 м), ее южный

и западный берега очень отмелые (до 2–3 м), дно около берегов неровное (рис. 1, б).

Бухта Отмелая является частью бухты Нордвик и располагается к западу от полуострова Урюнг-Тумус. Берега Отмелой низкие, особенно в ее вершине, и большей частью заболоченные. На ее западном берегу имеются короткие активные клифы. Глубины в зоне входа в бухту составляют 6–8 м, а в ее средней части — 5–6 м. В кутовой части бухты располагается осыхающая отмель (шириной до 1,5 км) сложенная песчано-алевритовыми и песчаными грунтами.

Геоморфология

Сопредельная с исследуемыми акваториями суша представляет собой прибрежную часть Северо-Сибирской пологохолмистой мохово-лишайниковой тундровой низменности полосы материковых тундр — типичную выположенную ледниковую равнину со средней абсолютной отметкой 79,3 м. Для нее характерны кочкарные болота, мелкие формы мерзлотного рельефа — бугры морозного пучения, небольшие округлые термокарстовые озера размером до 500 м и глубиной до 1,5 м, солифлюкционные террасы. Рельеф равнины — сглаженный послеледниковый. Клифы повсеместно (через каждые 50–70 м) взрезаны пологими ложбинами с временными водотоками. Берег, непосредственно примыкающий к побережью моря Лаптевых, к северо-востоку и юго-западу сложен активными клифами высотой до 20–25 м. Водораздельные пространства перекрыты чехлом рыхлых четвертичных отложений, представленных спектром пород от валунов и песков до супесей и суглинков.

В геоморфологическом отношении бухта Моржовая представляет собой полого наклоненную в юго-восточном направлении приливную равнину, практически полностью затапливаемую во время сизигийных приливов (максимальная высота приливов — до 0,8 м). Берег в кутовой части заболоченный. Дно самой бухты выполнено преимущественно глинистыми осадками мощностью до 0,3–1,1 м.

Лагуна имеет очень сложное геоморфологическое строение, отражающее историю геологического развития данной территории в голоцене. В ее строении можно выделить две зоны — продольных кос (I) и открытой воды (II) (рис. 2).

Зона продольных кос представляет собой систему полузамкнутых сообщающихся водоемов, отделенных друг от друга направленными друг к другу косами второго порядка (протягивающихся в направлении северо-запад — юго-запад). Из-за общего уклона всей территории в юго-восточном направлении эти преимущественно песчано-галечные образования полностью обсыхают во время сизигийных отливов, причем чем мористее расположена коса, тем менее она подвержена осушке. В зоне кос можно выделить три сегмента:

- Ia — зона бухты, полностью вышедшая на дневную поверхность и не затапливаемая водой даже в сизигийный прилив;
- Ib — зона сизигийного прилива и регулярной осушки (район кутовой части лагуны, затапливаемый водой в сизигийный прилив, где происходит преимущественно транзит осадочного материала);
- Iv — зона, постоянно находящаяся под водой, где происходит преимущественно седиментация осадка.

Бухта Отмелая, являющаяся частью бухты Нордвик, находится к западу от мыса Нордвик и с юга и запада отделена от остального залива одноименной косой. Этот район входит в состав Северо-Сибирской низменности и принадлежит Анабарскому району Енисей-Ленской области полосы материковых тундр, для которой обычны кочкарные болота и мелкие формы мерзлотного рельефа в виде солифлюкционных террас, термокарстовых воронок и байджерахов. Выровненность территории (полого наклоненной к морю) выражена в практически

плоских горизонталях элементов рельефа — плосковерхих водоразделах, плоских днищах речных долин и озерных котловин. Доминирующая высота — гора Соляная Сопка, достигающая 120 м над уровнем моря. В остальной части высотные отметки составляют 35–40 м. Берега бухты низкие, особенно в ее вершине, и большей частью заболоченные. На западном берегу имеются короткие активные клифы. Глубины акватории плавно нарастают в сторону моря до 10 м, составляя 6–8 м на входе в бухту и 5–6 м в ее средней части. В вершине бухты распо-

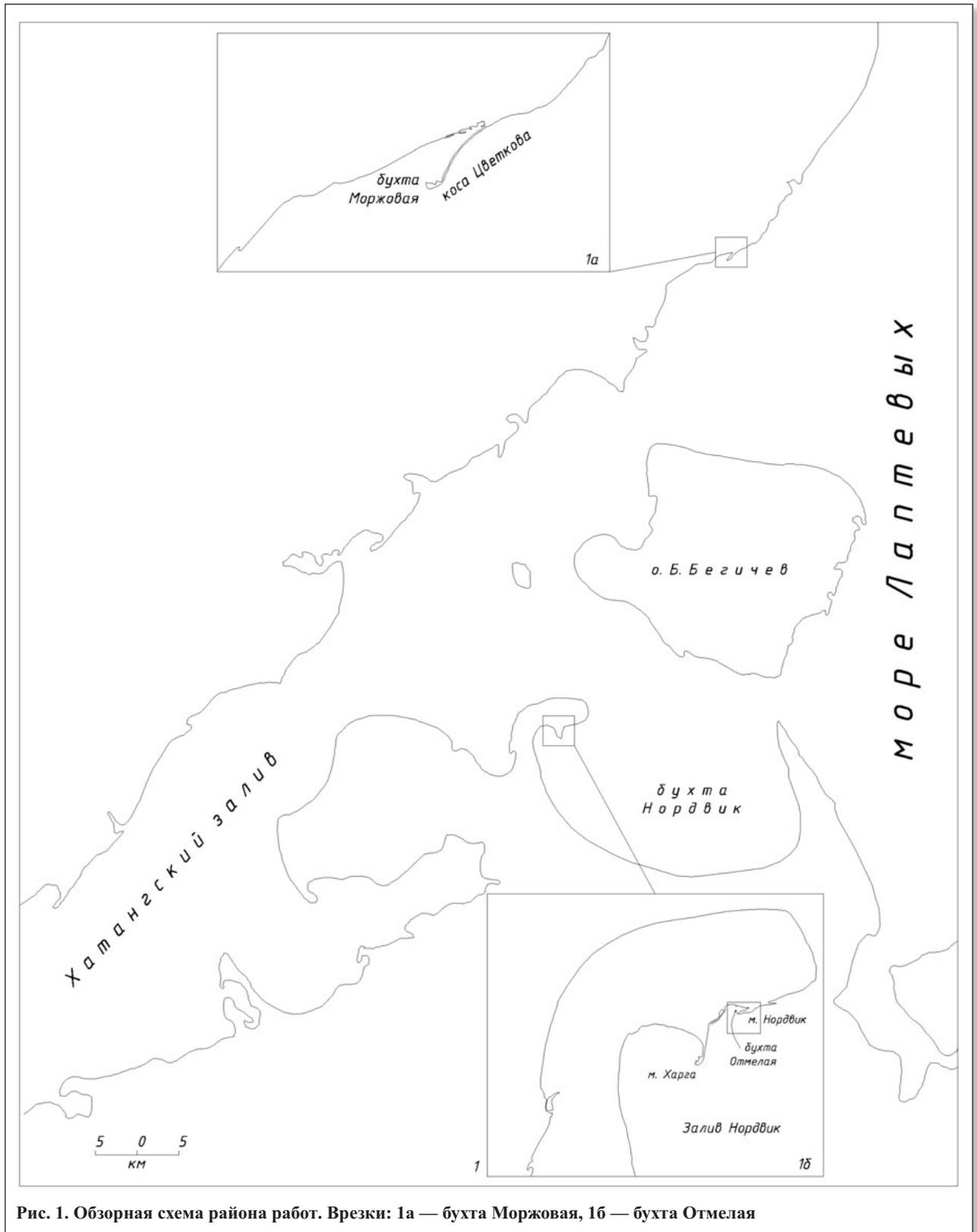


Рис. 1. Обзорная схема района работ. Врезки: 1а — бухта Моржовая, 1б — бухта Отмелая



лагается очень пологая осыхающая отмель (приливная равнина) шириной до 1,5 км, сложенная песчано-алевритовыми и песчаными грунтами. Уровень осушки меняется в зависимости от фаз Луны с максимальной величиной 0,8 м. Наибольшая мощность современных донных осадков отмечается в кутовой части бухты.

Гидрологический режим акватории определяется волновой деятельностью, постоянными приливо-отливными и сгонно-нагонными явлениями. Характер волнения контролируется ветровым режимом (2–4 балла) и глубиной моря на конкретном участке. Преобладающее направление волнения — северо-восточное. Приливы носят полусуточный характер с амплитудой до 1,5–2,0 м. Величины сгонно-нагонных колебаний уровня моря существенно меньше — 0,2–0,5 м. Постоянные течения выражены в поступлении воды из центральной части Арктического бассейна и Карского моря параллельно восточному берегу полуострова Таймыр.

Район исследований расположен в области распространения многолетнемерзлых пород с мощностью деятельного слоя от 0,35–0,50 м (глины) и 1,5 м (пески) на суше до 1,5 м и более на акватории. Породы, залегаю-

щие под водами бухт, на поверхности талые (охлажденные) и пластичномерзлые на глубине.

Литологическое строение и свойства осадков

Опробование верхней части разреза бухты Моржовая проходило во всех трех сегментах выделенных геоморфологических элементов. Следует отметить, что условия седиментации (и как ее отражение — строение верхней части секвенции донных осадков до вечномерзлых пород, т.е. до глубины от поверхности дна 0,3–1,0 м) в каждом из трех выделенных сегментов бухты имеют свою специфику. Геоморфологическое строение дна бухты достаточно сложное. Многочисленные локальные понижения в виде седиментационных ванн, соединенных между собой каналами стока (на осушке) и подводными желобками (на акватории), затрудняют восстановление целостной картины осадконакопления. Единственным повсеместно распространенным горизонтом, который можно достаточно хорошо охарактеризовать в целом, — современные алевро-пелитовые илы, практически полностью покрывающие дно бухты сплошным чехлом. Во время «стоп-воды»¹

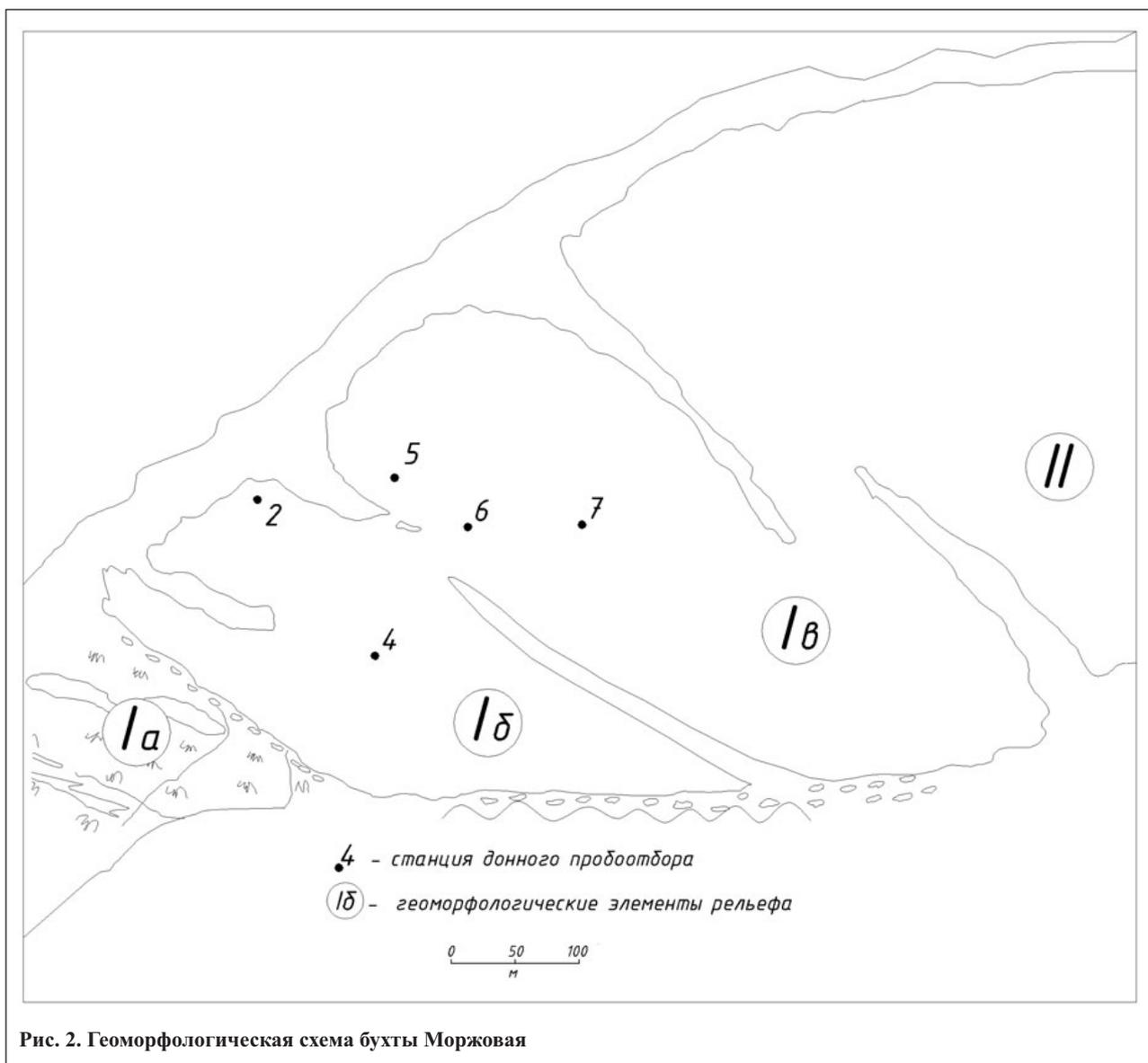


Рис. 2. Геоморфологическая схема бухты Моржовая

¹ Середины между приливом и отливом, когда движение воды прекращается.

над локальными седиментационными ваннами отчетливо заметна взвесь («осадочный туман») в виде полупрозрачной глинистой суспензии толщиной до 2–3 см.

В зоне Ia под гидровыми почвами мощностью до 7 см залегают маломощные супесчано-суглинистые отложения коричневатого-серого цвета со щебнем и дресвой (до глубины 30 см). Весь отложенный в аквальный период материал был полностью дегидратирован, уплотнен и локально эродирован поверхностными водотоками.

Зона Ib, периодически затопляемая во время сизигийных приливов, в которой, собственно, и формируются современные донные отложения, имеет следующий разрез (сверху вниз по глубине от поверхности дна):

- примерно до 0,3 см — коричневатого-охристая придонная глинистая суспензия;
- 0,3–3,0 см — серовато-зеленый, серый и оливково-болотный текучий водонасыщенный глинистый ил (граница с нижележащим слоем резкая);
- 3,0–8,0 см — черный комковатый суглинистый ил;
- 8,0–8,5 см — серо-черный мягкопластичный водонасыщенный суглинок (переход к нижележащему слою постепенный — 3–5 мм);
- 8,5–20,0 см — серовато-зеленая водонасыщенная песчаная супесь;
- 20,0–35,0 см — среднезернистый песок (нижняя часть горизонта представлена крупнозернистым и гравелистым песком с единичной плохоокатанной галькой и щебнем триасовых аргиллитов);
- 35,0–37,0 см — щебень с супесчаным заполнителем;
- 37,0 см и глубже — многолетнемерзлые породы.

Отмечается увеличение мощности глинистых осадков от берега бухты к ее центру, связанное с более длительным периодом пребывания центральной части под водой (рис. 3, а).

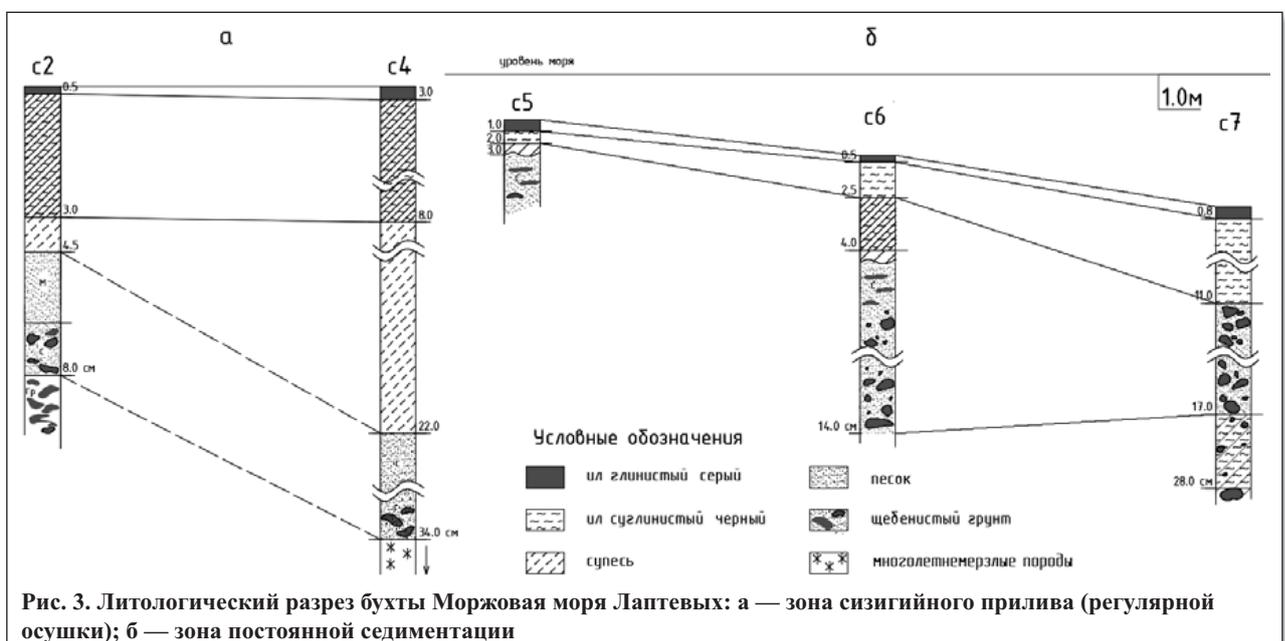
По литологическому строению зона Ib во многом схожа с зоной Ib (рис. 3, б), но есть два отличия: в зоне Ib отмечаются существенное увеличение мощности алевро-пелитовых илов (по данным скважины 7 — до 11 см в самой глубоководной точке) и отсутствие прослоя серого глинистого ила между придонной суспензией и черным суглинистым илом. Это связано, на взгляд авторов, с перио-

дическим выходом донного осадка в зоне Ib в субэвральные условия с последующим интенсивным окислением.

Схожая картина осадконакопления наблюдается в бухте Отмелая залива Нордвик. В ней отсутствует система перпендикулярных кос, дно плавно понижается в сторону залива, хорошо прикрыто с востока косой от эродирующих его вдольбереговых течений, а условия седиментации способствовали более мощному (до 33 см) накоплению глинистого осадочного материала. Кроме этого отмечается существенно большее количество глинистой суспензии над осадком (до 5–8 см), иногда в виде хлопьевидно-нитевидных образований. Верхняя часть разреза полностью повторяет аналогичный разрез зоны Ib бухты Моржовая, с той лишь разницей, что мощности выделенных слоев здесь больше.

Необходимо подчеркнуть, что, хотя все исследованные донные осадки относятся по гранулометрическому составу к алевро-пелитам, они существенно меняют свои физико-химические свойства (влажность, верхний и нижний пределы пластичности, число пластичности, показатель текучести) в зависимости от места нахождения в разрезе. Отмечен по существу плавный переход глинистых илов в текучие супеси в бухте Моржовая и глинистых илов в текучие суглинки в бухте Отмелая (табл. 1). Переход одного типа грунта в другой в осадках обеих бухт сопровождается закономерным уменьшением содержания органического углерода $C_{орг}$ (с 4,3 до 1,7%), что является еще одним подтверждением разделения грунтов на органико-минеральные и минеральные порогом 3% по $C_{орг}$. В бухте Моржовая граница перехода находится на приблизительно глубине от уровня дна 8 см, в бухте Отмелая — на глубине около 15 см.

Отмеченная тенденция в изменениях показателей свойств осадка полностью согласуется с классической схемой. Во всех изученных колонках бухт Моржовая и Отмелая происходит закономерное снижение по глубине залегания естественной влажности осадка W_e (с 103 до 19%, с 375 до 60% соответственно), содержания органического углерода $C_{орг}$ (с 3,3 до 1,8%, с 4,3 до 1,7%) и, наоборот, увеличение плотности ρ (с 1,25 до 1,40 г/см³, с 1,07 до 1,39 г/см³).





Минеральный состав отложений

Минеральный состав алевро-пелитовых илов бухт заливов моря Лаптевых характеризуется минеральными ассоциациями, практически полностью повторяющими минеральный состав горных пород сопредельной суши. В донных осадках бухты Моржовая слоистые силикаты представлены слюдами, хлоритом и каолинитом. Слюды на спектрах РФА диагностируются по пику 10,0 Å и по целочисленной серии отражений, стабильных после насыщения образцов этиленгликолем. Интенсивное отражение для $d/N=5,0$ Å (где d — межплоскостное расстояние; N — порядок отражения; d/N — межплоскостное расстояние, соответствующее анализируемому пику) указывает на присутствие диоктаэдрической разности. Хлорит идентифицируется по стабильному положению пика 14,2 Å после насыщения этиленгликолем и целочисленной серии отражений. На наличие каолинита в присутствии хлорита указывает раздвоенность пика в области 3,54 Å (хлорит) — 3,58 Å (каолинит). Помимо слоистых силикатов повсеместно присутствуют кварц и полевые шпаты.

Набор минералов в донных осадках бухты Отмелая залива Нордик отличается присутствием «сметитовой фазы», диагностируемой по наличию пика с величиной $d/N \geq 17$ Å после насыщения этиленгликолем. Определение ее состава по имеющимся данным затруднительно: она может быть представлена как индивидуальными сметитами, так и смешанослойными образованиями с высоким (>50%) содержанием сметитовых пакетов. Однако отсутствие отражения базального рефлекса d_{002} указывает на то, что более вероятно присутствие в образцах смешанослойного образования, чем индивидуального сметита. Появление «сметитовой фазы» обусловлено трансформацией хлорита — соответственно, она может быть идентифицирована как смешанослойное неупорядоченное хлорит-сметитовое образование. По асимметрии отражения для $d/N=10,0$ Å, исчезающей после насыщения образцов этиленгликолем, диагности-

руется присутствие небольшого количества (примеси) смешанослойного неупорядоченного слюда-сметитового образования с низким содержанием сметитовых пакетов. Как и в осадках бухты Моржовая, здесь идентифицированы кварц и полевые шпаты.

На уровне тенденции отмечена лучшая окристаллизованность слоистых силикатов и их большее содержание в донных осадках бухты Отмелая по сравнению с таковыми бухты Моржовая. Значительных изменений в минеральном составе по глубине осадка в обеих бухтах не отмечено. Однако в бухте Моржовая отмечается постепенное увеличение доли хлорита по отношению к каолиниту по глубине осадка. В донных осадках бухты Отмелая соотношение хлорита и каолинита примерно одинаково.

Геохимия

До проведения детальных геохимических исследований осадка был осуществлен химический анализ воды из обеих бухт (табл. 2). Как следует из сравнительного анализа полученных результатов, при общей схожести химического состава вода из бухты Моржовая обладает большей минерализацией, что, возможно, обусловлено существующей гидрологической обстановкой. Свободный водообмен между бухтой и остальной акваторией моря Лаптевых затруднен из-за системы кос, в которой, по-видимому, формируются более застойные условия.

Для выяснения более полной картины образования осадков была проведена оценка показателей активности ионов галогенов (F^- , Cl^- , Br^- , J^-) а также ряда сопутствующих анионов (NO_3^- , SO_4^{2-} , CO_3^{2-}) и катионов (NH_4^+ , Fe^{3+} , Cu^{2+}) в водорастворимой фазе осадков (табл. 3). Анализы проводились прямым потенциометрическим методом с использованием ион-селективных электродов и стандартных методик.

Особое внимание при этом было обращено на поведение галогенов. В первую очередь это касалось гео-

Таблица 1

Показатели физико-химических свойств и гранулометрического состава донных осадков бухт моря Лаптевых*																					
Бухта	Глубина отбора, см	W_e , %	W_L , %	W_P , %	I_P	I_L	ρ_s , г/см ³	ρ , г/см ³	n , %	e	$C_{орг}$, %	Содержание, % по массе, гранулометрических фракций с размером частиц, мм									
												2,0÷1,0	1,0÷0,5	0,5÷0,25	0,25÷0,1	0,1÷0,05	0,05÷0,01	0,01÷0,005	0,005÷0,002	<0,002	
Моржовая	0÷3	1,03	0,48	0,30	0,18	4,06	2,76	1,25	78	3,482	3,3	-	-	4,5	7,3	15,9	40,2	13,8	11,3	7,0	
	3÷7	0,74	0,40	0,32	0,08	5,25	2,71	1,26	73	2,742	3,1	-	-	0,4	10,4	15,9	39,9	13,8	12,3	7,3	
	8÷12	0,47	0,31	0,26	0,05	4,20	2,69	1,33	65	1,825	2,8	-	-	0,1	13,5	16,8	43,4	11,4	10,3	4,5	
	13÷16	0,22	0,23	0,19	0,04	1,00	2,69	1,36	60	1,488	1,9	3,7	3,5	13,1	19,6	11,1	24,7	10,0	9,5	4,8	
	18÷22	0,19	0,21	0,17	0,04	1,25	2,69	1,40	59	1,413	1,8	-	4,0	15,4	20,8	10,9	24,7	10,3	9,2	4,7	
Отмелая	0÷1	3,75	0,71	0,50	0,21	11,68	2,71	1,07	93	8,076	4,3	-	-	2,0	10,7	8,6	35,7	16,8	15,5	10,7	
	3÷5	2,24	0,51	0,35	0,16	11,81	2,75	1,04	88	7,567	3,3	-	-	-	3,1	10,8	37,6	19,5	18,7	10,3	
	9÷15	1,04	0,39	0,28	0,11	6,91	2,72	1,12	80	3,954	3,0	-	-	-	3,7	7,4	39,9	20,1	16,3	12,6	
	20÷25	0,85	0,54	0,42	0,12	3,58	2,73	1,31	74	2,855	1,9	-	-	2,4	10,5	7,2	35,7	18,5	13,6	12,1	
	35÷40	0,60	0,34	0,25	0,09	3,89	2,71	1,39	68	2,119	1,7	-	0,1	4,6	9,6	11,8	38,7	16,9	13,8	10,5	

* W_e — естественная влажность; W_L — верхний предел пластичности; W_P — нижний предел пластичности; I_P — число пластичности; I_L — показатель текучести; ρ_s — плотность частиц грунта; ρ — плотность грунта; n — пористость, e — коэффициент пористости, $C_{орг}$ — содержание органического вещества.

Таблица 2

Результаты химического анализа проб воды						
Элементы анализа	Содержание в пробах воды из бухты					
	Отмеляя			Моржовая		
	мг/дм ³	мг-экв/дм ³	%-экв	мг/дм ³	мг-экв/дм ³	%-экв
Ca ²⁺	96,2	4,80	4,2	127,3	6,35	3,7
Mg ²⁺	245,0	20,15	17,6	369,7	30,40	17,8
K ⁺ + Na ⁺	2 066,5	89,86	78,3	3 077,5	133,82	78,5
Сумма	2 407,7	114,81	100,0	3 574,4	170,57	100,0
SO ₄ ²⁻	376,4	7,84	6,8	660,6	13,76	8,1
Cl ⁻	3 726,5	105,09	91,5	5 508,1	155,33	91,1
HCO ₃ ⁻	114,7	1,88	1,6	90,3	1,48	0,9
Сумма	4 217,6	114,81	100,0	6 259,0	170,57	100,0
Минеральный остаток	6 567,9	-	-	9 788,2	-	-
pH	7,82	-	-	7,80	-	-

химии йода и брома. Хорошо известно, что органическое вещество морских осадков обогащено йодом и в меньшей степени бромом [11]. И считалось, что поведение именно этих элементов в первую очередь будет отражать изменения в системе «поровый раствор — осадочный материал» на разных этапах формирования отложений. Это предположение подтверждается литературными данными, свидетельствующими о том, что в процессе диагенеза йод переходит из органического материала в поровые растворы [13]. Таким образом, он может играть существенную роль при характеристике степени диагенеза. Кроме того, дальнейшая история йода и брома в ходе формирования осадка может приобретать различные черты при изменении окислительно-восстановительного потенциала системы, поскольку на фоне широкой области устойчивости бромид-иона в природных условиях йод может находиться в различных формах с различными степенями окисления.

Рассмотрение геохимических данных показывает, что наблюдается отчетливое изменение состава водорастворимой части порового пространства глинистых осадков в процессе их раннего диагенеза. Как и ожидалось, наиболее четкая взаимосвязь (с коэффициен-

том корреляции 0,90) наблюдается между электродвижущей силой йодид-иона EDS_{J^-} (мВ) и общим количеством органики в осадках ($C_{орп}$, %):

$$EDS_{J^-} = 0,125 \cdot C_{орп} + 3,49.$$

Неожиданно высокими и статистически значимыми оказались корреляции между электродвижущей силой фтора и основными индикаторными параметрами диагенеза — содержанием органического вещества в осадках и их естественной влажностью [5].

Факторный анализ всей совокупности геохимических данных методом главных компонент показал, что основную часть (68%) изменчивости рассматриваемой системы можно объяснить вариациями трех ассоциаций геохимических параметров (рис. 4):

- 1) EDS_{F^-} , EDS_{J^-} , $EDS_{NH_4^+}$;
- 2) EDS_{F^-} , $EDS_{SO_4^{2-}}$, $EDS_{CO_3^{2-}}$, $EDS_{NO_3^-}$, pH, Eh;
- 3) EDS_{Br^-} , EDS_{Cl^-} , $EDS_{Cu^{2+}}$, $EDS_{Fe^{3+}}$.

Таблица 3

Показатели активности ионов донных осадков бухт моря Лаптевых*															
Бухта	Глубина отбора, см	pH	Eh	TDS, %	EDS, мВ										
					Cl ⁻	NH ₄ ⁺	Cu ²⁺	Br ⁻	K ⁺	J ⁻	Fe ²⁺	CO ₃ ⁻	F ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻
Моржовая	0÷3	8,15	133	1,74	-141,8	187,8	-221,4	-127,4	-459,3	-7,9	-113,9	217,6	-149,3	150,9	154,5
	3÷7	7,90	125	1,12	-154,2	182,0	-245,5	-140,8	-456,5	7,3	-116,1	208,1	-157,3	143,3	125,4
	8÷12	7,59	122	1,11	-157,2	185,8	-231,9	-147,1	-459,6	9,6	-109,7	190,5	-169,1	136,5	140,6
	13÷16	7,78	116	0,58	-167,6	194,7	-248,2	-156,7	-465,7	27,3	-119,6	210,6	-154,8	154,7	138,8
	18÷22	7,88	112	0,64	-154,8	195,5	-246,6	-148,7	-466,4	22,8	-121,0	213,0	-158,2	153,2	137,2
Отмеляя	0÷1	7,98	124	1,72	-145,1	189,3	-241,2	-136,6	-466,2	19,4	-124,9	231,4	-156,9	158,1	171,1
	9÷15	7,83	127	0,94	-158,8	184,6	-240,2	-152,4	-458,0	22,5	-124,7	233,3	-155,7	156,7	151,7
	35÷40	7,83	134	0,83	-168,4	183,4	-235,0	-161,1	-460,3	21,8	-123,6	238,3	-154,1	158,1	149,9

* pH — водородный показатель; Eh — окислительно-восстановительный потенциал; TDS (Total Dissolved Solids) — общая минерализация; ЭДС — электродвижущая сила гальванического элемента по данным потенциометрии.

Ассоциация (корреляция) йода с аммонием — хорошо известный факт, отражающий процесс освобождения этих компонентов при деструкции азотсодержащего органического вещества [10]. Доминирующая роль ионов фтора во второй ассоциации отражает, по-видимому, процессы перераспределения элементов в системе «поровые растворы — фторсодержащие слоистые минералы глинистой фракции» на общем фоне изменения окислительно-восстановительных условий в поровом пространстве осадков в ходе их диагенетических преобразований. Третья ассоциация отражает в первую очередь общую минерализацию поровых вод, роль которой, возможно, лимитируется процессами выделения воды (наряду с йодом и аммонием) при деструкции органического вещества.

Следует особо отметить, что рассматриваемые выделенные геохимические ассоциации на факторной диаграмме достаточно четко коррелируют со степенью диагенеза, определенной на основе содержания органического углерода и показателей физико-химических свойств осадков.

Условия седиментации

Отличительной особенностью бухт заливов моря Лаптевых является полное преобладание процессов физического выветривания (морозного) пород сопредельной суши над химическим. Определяющими факторами седиментации в безледный период являются приливно-отливные течения и ледовый разнос. Условия седиментации в обеих рассматриваемых бухтах одинаковы: основным источником поступления осадочного материала является твердый сток ручьев с сопредельной суши (донная и боковая речная абразия водотоками в летний период). Большая часть терригенного материала выносится в море приливно-отливными течениями, а меньшая остается в зоне кос, формируя маломощный осадочный чехол.

Огромное значение имеет фактор ледового разноса. По всей видимости, как отдельные льдины, так и сплошные ледяные поля, закоренные на дне бухт, вмораживая в свою нижнюю часть какое-то количество осадка, которое затем выносится в открытое море. Частые штормы северных направлений с наложенными на них приливами и отливами перемещают отдельные ледяные глыбы по площади бухт, тем самым способствуя активному перемещению верхнего слоя осадков.

Вопрос длительности существования вновь образованного осадка в летний период остается открытым. Соотношение количества оставшегося в бассейне седиментации свежееотложенного осадка и осадка, вынесенного льдинами и штормами в открытое море, трудно поддается количественному учету. Оно полностью зависит от гидрологической характеристики конкретного временного периода.

Сочетание крайне низкой скорости физического выветривания береговых клифов, незначительного (вплоть до минимального) привноса терригенного материала с сопредельной суши в короткий временной промежуток полярного лета, постоянные приливно-отливные течения и наличие вечной мерзлоты опреде-

ляют крайне незначительную мощность прибрежно-морских донных осадков.

Вопросы площадного распространения донных отложений в морях арктического бассейна, геолого-геоморфологические и гидрологические факторы, контролирующие процессы осадкообразования, а также общие вопросы трансформации осадков подробно освещены А.П. Лисицыным [7].

Авторам настоящей статьи представляется, что в контексте данной работы особенно важно рассмотреть процесс формирования и последующей трансформации собственно глинистых морских осадков (алевропелитовых илов) в таких экстремальных природных условиях. Причем важнейшим моментом в характеристике процесса седиментации является выбор таких объективных параметров и критериев состояния «осадочной системы», которые бы полностью исключали переменные факторы (соленость, гранулометрический состав, набор глинистых минералов), присущие конкретной природной обстановке. В общем виде можно предположить, что каждой стадии формирования глинистого осадка соответствуют свои объективные и строго определенные физико-химические параметры «осадочной системы», которые, в свою очередь, выражаются конкретными числовыми значениями. Определив эти показатели, можно достаточно уверенно охарактеризовать не только текущее состояние донных отложений, но и направленность и последующую динамику постседиментационных процессов.

Вопросу стадийности образования глинистых пород (построенных на различных критериальных признаках) посвящено большое количество работ. Фундаментальные работы рассматривают весь процесс седиментогенеза в целом, всю совокупность проблем литогенеза, частные — разрабатывают ее отдельные положения.

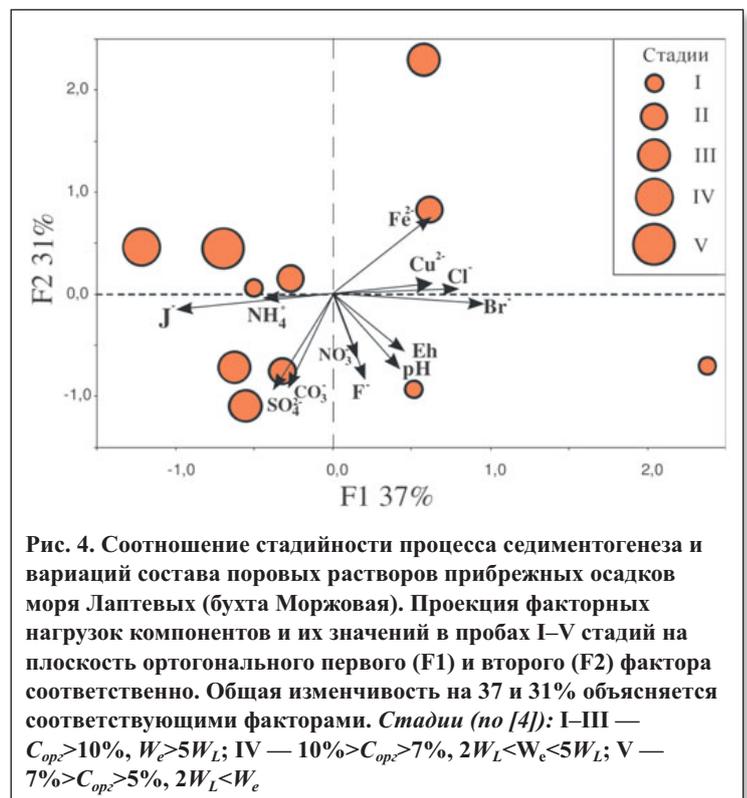


Рис. 4. Соотношение стадийности процесса седиментогенеза и вариаций состава поровых растворов прибрежных осадков моря Лаптевых (бухта Моржовая). Проекция факторных нагрузок компонентов и их значений в пробах I–V стадий на плоскость ортогонального первого (F1) и второго (F2) фактора соответственно. Общая изменчивость на 37 и 31% объясняется соответствующими факторами. Стадии (по [4]): I–III — $C_{opz} > 10\%$, $W_e > 5W_L$; IV — $10\% > C_{opz} > 7\%$, $2W_L < W_e < 5W_L$; V — $7\% > C_{opz} > 5\%$, $2W_L < W_e$

Качественный прорыв в исследованиях седиментогенеза и диагенеза произошел после разработки теории физико-химической механики дисперсных сред, с помощью которой удалось построить двухфазную (из твердого и жидкого компонентов) модель формирования глинистого осадка [8, 9]. Весь процесс формирования «осадочной системы» (до текучих глин) был разбит на следующие четыре стадии: коагуляция, агрегация, структурообразование, физико-химическое уплотнение. Однако в природных условиях данная модель не полностью соответствует реальности, так как не учитывает такой важнейший компонент грунта, как органическое вещество, которое на ранних стадиях осадочного процесса активно участвует в транспортировке, осаждении материала, в формировании первичных структурных (коагуляционных) связей в системе «частица — суспензия — осадок (протогрунт) — ил».

Ранее была предложена новая модель формирования глинистых осадков в присутствии органического вещества на основе положений физико-химической механики дисперсных сред [4]. При этом на основе анализа вариаций физических показателей свойств геологической среды, широко используемых в грунтоведении, детально рассматривалась стадийность процесса формирования глинистых осадков (седиментогенез). Было показано, что при более детальной характеристике стадий формирования глинистого осадка целесообразно использовать три основных параметра — естественную влажность (W_e), влажность на границе текучести (W_L) и содержание органического вещества ($C_{орг}$).

В полузакрытых бухтах заливов моря Лаптевых абсолютное значение содержания $C_{орг}$ существенно меньше, а показатели физико-химических свойств (естественной влажности, пористости, показателя текучести, консистенции) значительно ниже, чем в донных осадках Белого моря, но, тем не менее, возможность выделения стадий формирования осадка представляется достаточно обоснованной. Помимо инструментально фиксируемых и присутствующих абсолютно во всех построениях стадий III («осадочный туман» —

$W_e > 5W_L$) и IX (текучая глина — $W \geq W_L$, $C_{орг} < 3\%$) выделяются стадии IV («минеральная жидкость» — $2W_L < W_e < 5W_L$), V («протогрунт» — $W_e \approx 2W_L$) и VI («органоминеральный ил» — $2W_L > W_e > W_L$).

Проведенные исследования в целом подтверждают следующее ранее высказанное предположение: «В других природно-климатических и фациальных условиях выделяемые стадии могут существенно отличаться по глубине или вовсе отсутствовать, но числовые значения физико-химических характеристик осадка в целом будут сохраняться» [4].

Различия в минеральном составе донных отложений бухт Моржовая и Отмелая объясняют различия в физико-химических свойствах донных осадков. Более высокие естественная влажность, содержание органических веществ и меньшие плотность грунта и плотность частиц грунта донных осадков в бухте Отмелая по сравнению с Моржовой обусловлены в том числе и наличием смектитовой составляющей в минеральном составе. Результаты проведенного комплекса геохимических исследований показали, что во всех выявленных ассоциациях геохимических параметров ведущую роль играют галогены — йод, фтор, бром (хлор). Именно эти компоненты наряду со стандартными показателями pH и Eh могут быть использованы в практических целях при экспресс-индикации состояния (степени диагенеза) глинистых осадков.

Заключение

Проведенные исследования показали, что, несмотря на крайне неблагоприятные условия седиментации, в формирующемся современном осадке, тем не менее, происходят заметные диагенетические процессы, нашедшие свое отражение как в изменениях физико-химических свойств, так и в минералогии и химизме донных грунтов. Только всестороннее изучение всех факторов седиментации дает комплексное понимание формирования свойств грунтов и в конечном итоге приводит к адекватной инженерно-геологической оценке территории.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бондаренко С.А. Донные отложения Лаптевоморского шельфа // Геолого-геофизические характеристики литосферы Арктического региона. СПб.: Изд-во ФГУП «ВНИИОкеангеология», 2000. Вып. 3. С. 93–103.
2. Здобин Д.Ю. Минеральный состав современных отложений бухт заливов моря Лаптевых / Материалы 6-го Всероссийского литологического совещания «Концептуальные проблемы литологических исследований в России». Казань, 2011. С. 314–317.
3. Здобин Д.Ю. Прибрежно-морской литогенез бухт заливов моря Лаптевых / Материалы Всероссийского совещания, посвященного 100-летию основателя Ленинградской литологической школы Льва Борисовича Рухина. Том I. СПб., 2012. С. 112–114.
4. Здобин Д.Ю. Стадийность образования глинистых грунтов в присутствии органического вещества // Геоэкология. 2013. № 3. С. 259–263.
5. Здобин Д.Ю., Табунс Э.В., Кукса Е.А. Галогены как геохимические индикаторы ранних стадий седиментогенеза глинистых осадков в присутствии органического вещества // Материалы 18-й Международной научной конференции (школы) по морской геологии. Том IV. М.: Геос, 2009. С. 77–82.
6. Латина Н.Н., Белов Н.А. Особенности процесса осадкообразования в Северном Ледовитом океане // Современные осадки морей и океанов. М.: Изд-во АН СССР, 1961. С. 86–97.
7. Лисицын А.П. Процессы океанской седиментации. М.: Наука, 1978. 392 с.
8. Осипов В.И. Природа прочностных и деформационных свойств глинистых пород. М.: Изд-во МГУ, 1979. 232 с.
9. Осипов В.И., Соколов В.Н., Еремеев В.В. Глинистые покрывки нефтяных и газовых месторождений. М.: Наука, 2001. 237 с.
10. Попов В.Г. Геохимические особенности и природа инверсии в подземной гидросфере Соликамской впадины // Геохимия. 2003. № 6. С. 641–650.
11. Gieskes J.M., Mahn C. Halide systematics in interstitial waters of ocean drilling sediment cores // Applied Geochemistry. 2007. V. 22. P. 515–533.
12. Kennedy H.A., Elderfield H. Iodine diagenesis in nonpelagic deep-sea sediments // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1987. V. 51. P. 2505–2514.