

КРИОЛИТОГЕНЕЗ

УДК 551.345; 551.351
DOI: 10.15372/KZ20240103
EDN: OLNUTD

СЕДИМЕНТОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ОТЛОЖЕНИЙ ИВАШКИНОЙ ЛАГУНЫ
(БЫКОВСКИЙ ПОЛУОСТРОВ)

О.В. Левочкина^{1,*}, В.Е. Тумской^{2,3}, О.В. Дударев^{3,4}

¹ Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, 625026, Тюмень, ул. Малыгина, 86, Россия

² Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 677010, Якутск, ул. Мерзлотная, 36, Россия

³ Томский государственный университет, 634050, Томск, просп. Ленина, 36, Россия

⁴ Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН,
690041, Владивосток, ул. Балтийская, 43, Россия

*Автор для контакта; e-mail: levochkina@yandex.ru

Представлены результаты седиментологического анализа донных отложений Ивашкиной лагуны, расположенной на южном берегу Быковского полуострова в юго-восточной части моря Лаптевых. Для этого были использованы данные о гранулометрическом составе отложений, полученные по образцам из скважин, пройденных в пределах термокарстовой котловины, занятой Ивашкиной лагуной. Использование С–Мд-диаграммы Р. Пассеги позволило уточнить генетическую интерпретацию отложений, проведенную первоначально по полевым данным. В пределах лагуны выделены голоценовые озерно-лагунные и таберальные образования, подстилающие их аллювиальные среднепозднеоплейстоценовые отложения, определены их седиментологические гранулометрические характеристики. Для выделенных фаций отложений реконструирована последовательность их формирования в процессе превращения термокарстового озера в морскую лагуну.

Ключевые слова: термокарстовые лагуны, море Лаптевых, озерные отложения, лагунные отложения, седиментологический анализ, диаграмма Пассеги.

Ссылка для цитирования: Левочкина О.В., Тумской В.Е., Дударев О.В. Седиментологический анализ отложений Ивашкиной лагуны (Быковский полуостров) // Криосфера Земли, 2024, т. XXVIII, № 1, с. 23–35. DOI: 10.15372/KZ20240103. EDN: OLNUTD.

GRAIN-SIZE ANALYSIS OF BOTTOM SEDIMENTS FROM IVASHKINA LAGOON,
BYKOVSKY PENINSULA

O.V. Levochkina^{1,*}, V.E. Tumskoy^{2,3}, O.V. Dudarev^{3,4}

¹ Earth Cryosphere Institute, Tyumen Scientific Centre of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Malygina St. 86, Tyumen, 625026 Russia

² Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Merzlotnaya St. 36, Yakutsk, 677010 Russia

³ Tomsk State University, Lenin Ave. 36, Tomsk, 634050 Russia

⁴ Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far East Branch of the Russian Academy of Sciences,
Baltiyskaya St. 43, Vladivostok, 690041 Russia

*Corresponding author; e-mail: levochkina@yandex.ru

The results of sedimentological analysis of bottom sediments of the Ivashkina Lagoon on the southern coast of Bykovsky Peninsula (southeast of the Laptev Sea) are presented. Core samples from boreholes drilled in the Holocene thermokarst depression now occupied by the lagoon have been analyzed. The use of grain-size distribution data and Passega C–Md diagrams makes it possible to refine the genetic interpretation of the sediments obtained from field descriptions. The Holocene lacustrine–lagoon and taberal formations and the underlying Middle and Late Pleistocene alluvial sediments have been identified, and their grain-size characteristics have been determined. We have further reconstructed the sequence of their formation while a thermokarst depression had been transformed into a lagoon.

Keywords: thermokarst lagoons, Laptev Sea, lake sediments, lagoon sediments, sedimentological analysis, Passega diagram.

ВВЕДЕНИЕ

Согласно современным представлениям [Романовский и др., 1999; Holmes, Creager, 1974; Bauch et al., 2001], обширная территория восточно-арктического шельфа во время поздненеоплейстоценового похолодания была осушена на сотни километров к северу от современного берега. В это время на его поверхности накапливались преимущественно синкриогенные высокольдистые отложения ледового комплекса (ЛК) мощностью до 60 м и более. Потепление климата в конце позднего неоплейстоцена привело к протаиванию ЛК и образованию многочисленных термокарстовых озер, под которыми развивались подозерные талики мощностью 100–150 м [Каплина, Ложкин, 1979; Каплина, 1981, 2009; Романовский и др., 1999; Тумской и др., 2001]. Если термокарстовые озера полностью или частично дренировались, то образовывались аласы, что сопровождалось промерзанием отложений с поверхности. В результате постепенного подъема уровня Мирового океана к середине голоцена значительная территория шельфа была затоплена [Дегтяренко и др., 1982; Bauch et al., 2001]. При этом термокарстовые котловины, затопляемые морем, преобразовывались в особые мерзлотно-геологические образования, названные термокарстовыми лагунами (ТЛ) [Романовский и др., 1999]. В ходе затопления они частично сохранили

основные особенности строения отложений аласного комплекса, свойственные термокарстовым котловинам [Романовский, 1961; Каплина, 2009]. Проникновение морских вод в их пределы приводило к увеличению солености воды, понижению ее температуры в придонных слоях, изменению криогенного состояния отложений, накоплению озерно-лагунных отложений.

Изучение развития ТЛ важно для понимания мерзлотно-геологического строения шельфа восточно-арктических морей, в пределах которого предполагается широкое распространение реликтовых форм таких лагун [Рекант и др., 2009; Касымская, 2012]. В настоящее время основным районом исследования ТЛ является Быковский полуостров, расположенный в юго-восточной части моря Лаптевых (рис. 1, а). На полуострове выделено несколько ТЛ, находящихся на разных стадиях развития. Одной из наиболее изученных является Ивашкина лагуна на юге полуострова. В 1999 г. в рамках российско-германской экспедиции “Laptev Sea System” в центре Ивашкиной лагуны пройдена скважина IV99 (см. рис. 1, б), выделены и датированы пять горизонтов отложений до глубины 6.1 м [Schirmer et al., 2018]. В 2004 г. совместной экспедицией геологического факультета МГУ и Института физико-химических и биологических проблем почвоведения

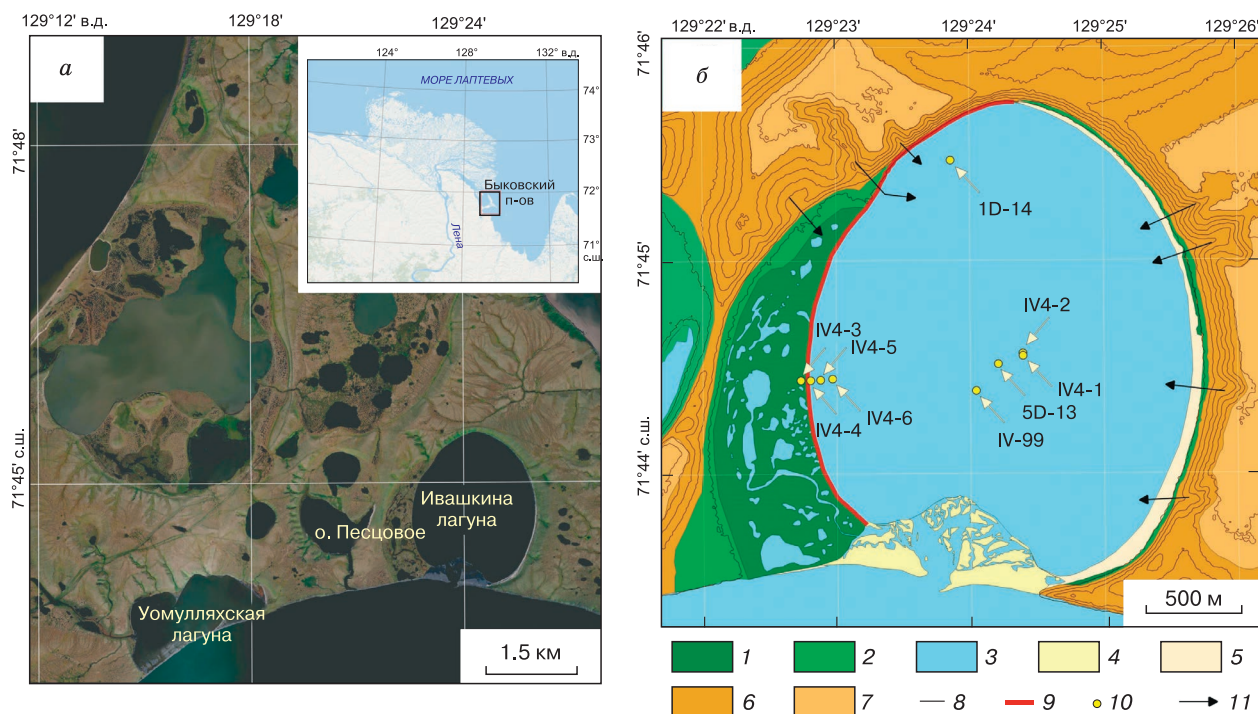


Рис. 1. Расположение термокарстовых лагун Быковского полуострова (а) (основа – фрагмент космоснимка, Google Earth) и геоморфологическая карта котловины Ивашкиной лагуны (б).

1 – I аласная терраса; 2 – II аласная терраса; 3 – водные объекты; 4 – коса; 5 – пляж; 6 – склоны едомы; 7 – поверхность едомы; 8 – изогипсы; 9 – термоабразионный берег; 10 – скважины и их названия; 11 – направление сноса материала.

(г. Пушино) под руководством В.Е. Тумского в западной части лагуны пройден профиль из шести скважин глубиной до 15 м (IV4-1–IV4-6), расположенных на мелководье и поверхности аласной террасы [Чевевер и др., 2007]. В 2013–2014 гг. российско-американской экспедицией ГОИ ДВО РАН под руководством И.П. Семилетова пройдены две скважины глубиной по 40 м (5D-13 и 1D-14), измерена температура пород, по керну получены данные о гранулометрическом и органохимическом составе отложений [Суховерков и др., 2014; Ульянцев и др., 2016, 2020; Погодаева и др., 2017; Рубан и др., 2017; Гершелис и др., 2019].

Однако до сих пор строение отложений и история развития Ивашкиной лагуны вызывают множество вопросов. Основными из них остаются время появления и пространственное развитие первичного термокарстового озера (или озер), степень дренированности котловины перед ее затоплением морем и, как следствие, криогенное строение ее отложений в настоящее время.

Цель данной работы – на основе геологических данных и седиментологического анализа керна скважин в Ивашкиной лагуне выделить основные фации отложений, относящиеся к разным этапам их формирования.

Природные условия района Ивашкиной лагуны

Быковский полуостров расположен в северо-западной части губы Буор-Хая моря Лаптевых (см. рис. 1, а). Современный рельеф полуострова образован едомными возвышенностями с абсолютными отметками до 40 м, разделенными термокарстовыми аласными котловинами, осушенными или с остаточными озерами, имеется также множество логов и термоэрозийных оврагов. В южной части полуострова, омываемой бухтой Тикси, располагаются три термокарстовые котловины, соединенные с морем. Суrowый климат территории (среднегодовая температура воздуха составляет $-12.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ [Погода..., 2021]) обуславливает сплошное распространение многолетнемерзлых пород (ММП), мощность которых может достигать 500 м и более. Среднегодовая температура пород в пределах едом составляет $-11\text{ }^{\circ}\text{C}$, а в пределах аласов около $-9\text{ }^{\circ}\text{C}$. В пределах термокарстовых озер и лагун существуют талики мощностью до 30 м [Куницкий, 1989].

Едомные возвышенности Быковского полуострова сложены ЛК: позднеплейстоценовыми аллювиально-делювиальными и озерно-болотными пылеватыми и опесчаненными, часто оторфованными суглинками [Слагодая, 2004; Siegert et al., 2002]. Для разрезов едомы в целом характерны пять горизонтов (сверху вниз), выделенные Е.А. Слагодая: горизонт I – голоценовые отложения; горизонт II ЛК – ритмично переслаивающи-

еся гравийные, песчаные и суглинистые отложения на юге полуострова, суглинистые – на востоке; горизонт III ЛК – торф в виде слоев, линз на севере и востоке полуострова или III – суглинки озерные в виде вложений на юге полуострова; горизонт IV ЛК – преобладающие суглинки, внизу разреза с прослоями песка, включениями гравия или IV – его таберирированные аналоги. Ледовый комплекс подстилается сортированными ритмично слоистыми аллювиальными песками горизонта V, возраст которых, по данным [Jenrich et al., 2021], соответствует среднему/позднему неоплейстоцену. Котловина Ивашкиной лагуны обрамлена едомой на западе с песчаным грубым составом горизонта II ЛК (аналог разреза мыса Раздельный), на севере и востоке – более тонкодисперсными отложениями II, III, IV ЛК (аналог разреза Мамонтовый–Хайата) [Слагодая, 2004].

В аласных отложениях полуострова распространены голоценовые озерные супеси и суглинки, а также полигональные торфяники с повторно-жильными льдами. В пределах лагун полуострова выделяются следующие горизонты отложений (снизу вверх): среднепозднеплейстоценовые аллювиальные пески, таберальные образования (вытаявшие и просевшие отложения ЛК), голоценовые отложения термокарстовых озер и ТЛ. Возраст озерных отложений Уомулляхской лагуны составляет 10.5 тыс. лет, собственно лагунных отложений – 7.4 тыс. лет [Jenrich et al., 2021]. Возраст отложений первичного термокарстового озера в пределах Ивашкиной лагуны составил 13 тыс. лет [Schirmeister et al., 2018], возраст озерно-лагунных отложений 286–540 лет.

Ивашкина лагуна – наиболее крупная термокарстовая лагуна, она имеет размер 2.0×2.5 км и отделена от бухты Тикси намывной косой. Средняя глубина лагуны составляет 2.0–2.5 м, уровень воды в ней колеблется в зависимости от стоннонагонных явлений на 0.5–1.0 м. В северо-западной части лагуны вблизи берега на дне расположено понижение длиной до 700 м и глубиной 4–5 м.

С запада лагуна ограничена I аласной террасой высотой до 1.5 м, затапливаемой морем во время штормовых нагонов, над ней выделяется II терраса высотой до 4 м (см. рис. 1, б). На поверхности I аласной террасы находится много озер глубиной до 1 м и соединяющих их проток. Почти все они солоноватые из-за нагонов с моря, о чем также свидетельствует плавник в пределах всей котловины. На восточном борту лагуны указанные террасы узкие, II аласная терраса по ширине не превышает 25 м, I терраса почти полностью размыта.

Геоморфологическое устройство котловины Ивашкиной лагуны привело к тому, что снос со склонов едомы наиболее интенсивно поступает в лагуну в ее северо-западной части, в районе глубокого понижения, менее интенсивно – с восточной

стороны. Склоновые процессы на западном борту котловины поставляют материал на поверхность II и I аласной террас, а в саму лагуну поступает материал из-за размыва уступа I аласной террасы, отступающей со скоростью 0.4–0.5 м/год [Schirmeister et al., 2018].

В строении толщи Ивашкиной лагуны были выделены аласные и озерные отложения, таберальные образования, т. е. ее разрез представляет собой типичный разрез термокарстовой котловины [Чевеверев и др., 2007]. Отложения в центре лагуны представлены чередованием охлажденных, талых и мерзлых пород и существенно отличаются от северо-западной части лагуны [Гершелис и др., 2019].

Границы горизонтов, выделенных в пределах Ивашкиной лагуны, прежде определялись по геологическим данным и на основании анализа органического вещества и разными авторами проводились на различных глубинах. Обобщенный анализ результатов бурения Ивашкиной лагуны до сих пор не проводился.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

В работе использованы данные скважины 5D-13 (14 проб), пройденной в центре лагуны, и скважины 1D-14, расположенной в северной части лагуны (см. рис. 1, б). Отбор керн в скв. 5D-13 осуществлялся до глубины 16 м, далее она была пройдена до глубины 41.1 м только для термометрии. Глубина устья скв. 5D-13 составляет 2 м. Скважина 1D-14 была пройдена до глубины 38 м, отбор образцов производился до глубины 36 м, глубина устья скважины составляет 1.8 м. Авторами используются данные гранулометрического состава до глубины 25.5 м (31 проба).

Были использованы также данные гранулометрического состава отложений Ивашкиной лагуны, полученные по скважине IV4-4 (см. рис. 1, б) глубиной 12.4 м (11 проб), опубликованные в [Чевеверев и др., 2007]. В 2004 г. точка, в которой производилось бурение, находилась вблизи берега, где глубина воды составляла не более 0.2 м. В настоящее время эта точка располагается приблизительно в 16 м от берега.

Сопоставление данных по скважинам разных лет осложнено тем, что определение гранулометрического состава производилось разными методами и по разным классификациям. Гранулометрический состав осадков скважин 5D-14 и 1D-14 размерности крупнее 0.1 мм определялся ситовым методом, менее 0.1 мм – на лазерном дифракционном анализаторе Mastersizer 2000 в лаборатории арктических исследований ТОИ ДВО РАН. При пробоподготовке не производилось диспергирование, производилось удаление органического вещества без удаления карбонатов. Определе-

ние гранулометрического состава образцов из скв. IV4-4 выполнялось на геологическом факультете МГУ ситовым и пипеточным методами в соответствии с [ГОСТ 12536-79, 1980].

В ходе полевого описания скважин выделялись слои, различающиеся по составу и строению отложений, в дальнейшем они дополнялись результатами определения гранулометрического состава и расчета статистических характеристик, отражающих динамический режим осадконакопления.

Для первичного выделения литодинамических типов отложений строили логарифмические и кумулятивные кривые, по которым определяли квартили Q_1 (75 %), Q_2 (50 %) и Q_3 (25 %) и рассчитывали следующие статистические параметры: медианное значение размеров частиц, коэффициент сортировки, асимметрия [Рейнек, Сингх, 1981].

Медиана (медианный размер частиц) Md информативна для хорошо сортированных мономодальных пород, при этом ее значение для полимодальных, гетерогенных пород может иметь искаженный смысл [Фролов, 1993]. Коэффициент сортировки So характеризует степень однородности отложений: хорошо сортированные $So < 2$, среднесортированные $So = 2-3$ и плохо сортированные $So > 3$ [Там же]. Отложения северных широт любого генезиса имеют большие значения So за счет влияния криогенеза [Данилов, 1983]. Асимметрия Sk позволяет оценить механическую дифференциацию обломочных частиц, степень гетерогенности и гранулометрическую зрелость осадков [Гроссгейм и др., 1984]. Положительные Sk указывают на преобладание фракции тонких частиц, отрицательные Sk – на преобладание крупных фракций в составе отложений.

Для анализа условий осадконакопления использовалась динамическая C–Md-диаграмма Р. Пассеги [Passega, Vyramjee, 1969], где C – 1%-й квартиль, приближенное значение максимального размера зерен; Md – медиана. Исходя из соотношения C и Md, по данной диаграмме можно определить способ транспортировки материала – во взвеси, путем перекачивания или сальтацией.

С.И. Романовский [1977] полагал, что динамические диаграммы должны иметь региональное обоснование, калибровку по отложениям с известным генезисом. Для Быковского полуострова такую работу сделала Е.А. Слагода [2004]. В настоящей работе особую сложность представляет анализ таберальных образований, так как они частично наследуют особенности гранулометрического состава отложений ЛК, а состав последних в районе п-ова Быковский обладает высокой изменчивостью. Тем не менее отложения Ивашкиной лагуны являются по большей части современными, их генезис и источники сноса в основном достаточно очевидны.

**РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ
СОСТАВА ОТЛОЖЕНИЙ**

Состав отложений скважины 5D-13

Слой I (0–4.6 м). Отложения представлены илом черным, в нижней части слоя – темно-серым суглинком (рис. 2, а). На глубине 3.4–3.5 м выделяется прослой мелкого песка. Состояние отложений охлажденное, с глубины 3.5 м – талое. Средняя Md составляет 0.012 мм. Распределения фракций в образцах (см. рис. 2, б) совпадают и имеют

трехвершинный характер с преобладанием фракции 0.01 мм. Сортировка средняя.

Слой II (4.6–9.0 м). Верхние 1.2 м – песок крупнозернистый, черный, талый. Ниже залегают переслаивающиеся супеси и суглинки, талые, а с глубины 7.8 м – мерзлые. Криогенная текстура (КТ) линзовидная. Среднее значение Md для супесей и суглинков составляет 0.054 мм. Кривые распределения для отложений слоя II имеют сходный трехвершинный характер, преобладают фракции 0.01 и 0.1 мм. Пески в верхней части слоя отличает

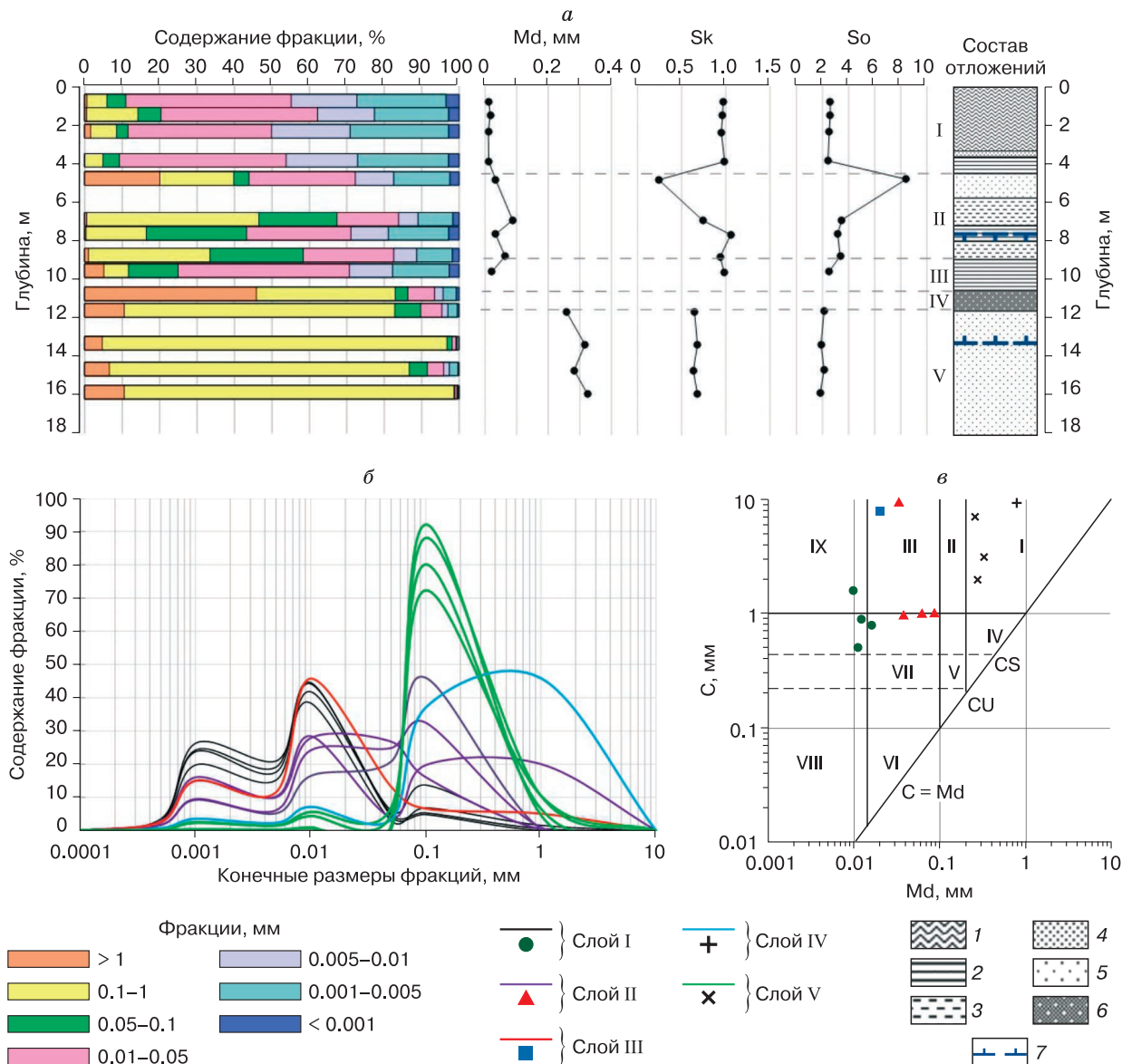


Рис. 2. Результаты анализа состава отложений Ивашкиной лагуны по скв. 5D-13.

а – состав отложений и их характеристики (Md – медианный размер частиц, Sk – асимметрия, So – коэффициент сортировки); штриховые линии – границы выделенных слоев I–V; 1 – ил, 2 – суглинок, 3 – супесь, 4–6 – песок (4 – мелкозернистый, 5 – крупнозернистый, 6 – гравелистый); 7 – граница ММП; б – логарифмические кривые распределения фракций для слоев I–V; в – динамическая C–Md-диаграмма отложений; римские цифры на рисунке обозначают сегменты I–IX динамических типов осадконакопления. CS – максимальные размеры зерен, транспортируемых во взвеси; CU – максимальный размер зерен, транспортируемых в однородных осадках взвеси.

плосковершинный характер кривой распределения, отсутствует преобладающая фракция. Сортировка в слое в целом средняя, в песках – плохая.

Слой III (9.0–10.8 м). Суглинки мерзлые, однородные. Криогенная текстура линзовидная. Кривая распределения имеет двухвершинный характер с выположенным “хвостом” за счет примеси грубых фракций и близка по характеру к кривым из слоя I. Отложения данного слоя отличаются выраженным преобладанием фракции 0.01 мм. Здесь Md составляет 0.021 мм, сортировка средняя.

Слой IV (10.8–11.7 м). Песок гравелистый, в мерзлом состоянии. Криогенная текстура массивная. Значение Md составляет 0.794 мм, в составе преобладают песок и гравий. На графиках распределения статистических параметров (см. рис. 2, а) значения коэффициентов данного слоя не приводятся, так как они искажают читаемость графиков. Здесь So песка плохая (4.1); Sk имеет отрицательное значение и не учитывается, так как этот параметр больше применим для частиц песчано-пылевой размерности.

Слой V (11.7–16.2 м). Чередование песков крупно- и мелкозернистых, мерзлых, с глубины 13.2 м – охлажденных. В мерзлых песках КТ массивная. Здесь Md составляет 0.295 мм. Отложения данного слоя среднесортированные, кривая распределения одновершинная, с преобладанием песчаной фракции (70–90 %). Размерность песчаных зерен постепенно увеличивается с глубиной.

На рис. 2, в приведена C–Md-диаграмма отложений скв. 5D-13. На диаграмме выделяются девять сегментов. Сегменты I, II, III и IX соответствуют преимущественно осадкам перекачивания, которые либо были отложены вблизи их источника, либо переносились в условиях, где осаждение взвеси было недостаточным. Сегменты IV, V, VI, VII соответствуют осадкам взвеси и в меньшей степени осадкам перекачивания. Линия Md = 0.1 мм разделяет однородные и градиционные взвеси. Сегменты IV, V и VI соответствуют преимущественно осадку градиционной взвеси, сегмент VIII – однородной тонкой взвеси и пелагической взвеси [Рейнек, Сингх, 1981; Passega, Vyramjee, 1969]. Отложения слоя I располагаются в верхней части сектора VIII и соответствуют осадкам, сформировавшимся преимущественно во взвеси и частично путем перекачивания. Такое положение (за счет высоких значений C) может говорить о большом количестве привнесенного извне материала. Тонкому озерному осадку соответствует нижняя часть сектора VIII. Отложения слоя I сформировались в значительной степени за счет размыва берегов и, вероятно, в достаточно неглубоком водоеме, где донные осадки подвергались волновому перемешиванию. Точка, располагающаяся в секторе IX, соответствует отложениям

с глубины 2.4 м. Такое положение на диаграмме говорит о том, что осадок на этой глубине формировался преимущественно за счет перекачивания частиц.

Отложения слоя II располагаются преимущественно в сегменте VII и характеризуются как осадки взвеси и, частично, осадки перекачивания. Отложения слоя III соответствуют осадкам перекачивания. В сегменте I располагаются пески из слоев IV и V.

Состав отложений скважины 1D-14

Слой I (0–0.3 м). Современные черные илы в охлажденном состоянии (рис. 3, а). Значение Md составляет 0.011 мм, фракционный состав, как и кривая распределения (см. рис. 3, б), совпадает с верхним горизонтом илов в центральной части лагуны.

Слой II (0.3–5.0 м). Переслаивание песка и ила опесчаненного с косою слоистостью, цвет от темно-серого до черного, состояние охлажденное, присутствуют включения гравия и растительных остатков. Значение Md варьирует от 0.024 до 0.282 мм. Сортировка меняется от средней до плохой, ухудшаясь сверху вниз по разрезу до глубины 2.55 м, далее до конца слоя она улучшается до So = 1.86. Кривые распределения имеют трехвершинный характер, преобладают фракции мелкого песка.

Слой III (5.0–12.0 м). Мелкозернистые пески, темно-серые, охлажденные. Нижние 0.4 м – прослой растительного детрита. Средняя Md составляет 0.232 мм. Сортировка по разрезу меняется от хорошей до плохой, значение асимметрии меняется незначительно. На глубине 9.5 м Md уменьшается до 0.079 мм за счет увеличения содержания глинистой и пылевой фракций, с глубины 11 м вниз по разрезу Md возрастает. Кривые распределения имеют трехвершинный характер, преобладает фракция мелкого песка.

Слой IV (12.0–12.2 м). Крупнозернистый песок с гравием и включениями детрита, мерзлый. Криогенная текстура массивная. Значения Md = 1.479 мм; So = 3.16, преобладают фракции песка и гравия; Sk отрицательная и не учитывается из-за преобладания крупнозернистого материала. Кривая распределения имеет одновершинный характер с выположенным “хвостом” в сторону тонких фракций, преобладают фракции крупного песка и гравия.

Слой V (12.2–25.5 м). Переслаивание песков крупно- и среднезернистых, с прослоями супеси, гравия и растительного детрита, состояние мерзлое. Криогенная текстура массивная. Цвет до глубины 17 м послойно меняется от охристо-серого до серого, ниже – светло-серый. Прослой растительного детрита уплотненного, темно-бурого цвета, с включением веточек толщиной до 5 мм. Про-

слои детрита имеют мощность от 1 до 10 см, часто залегают наклонно. Здесь Md меняется от 0.025 до 0.380. Сортировка частиц средняя. Кривые распределения трехвершинные, преобладает фракция песка.

C–Md-диаграмма отложений скв. 1D-14 (см. рис. 3, в) показывает, что ил из слоя I располагается в секторе VIII, соответствующем осадкам однородной взвеси. Смешанные отложения слоя II сконцентрированы преимущественно в сегменте VII.

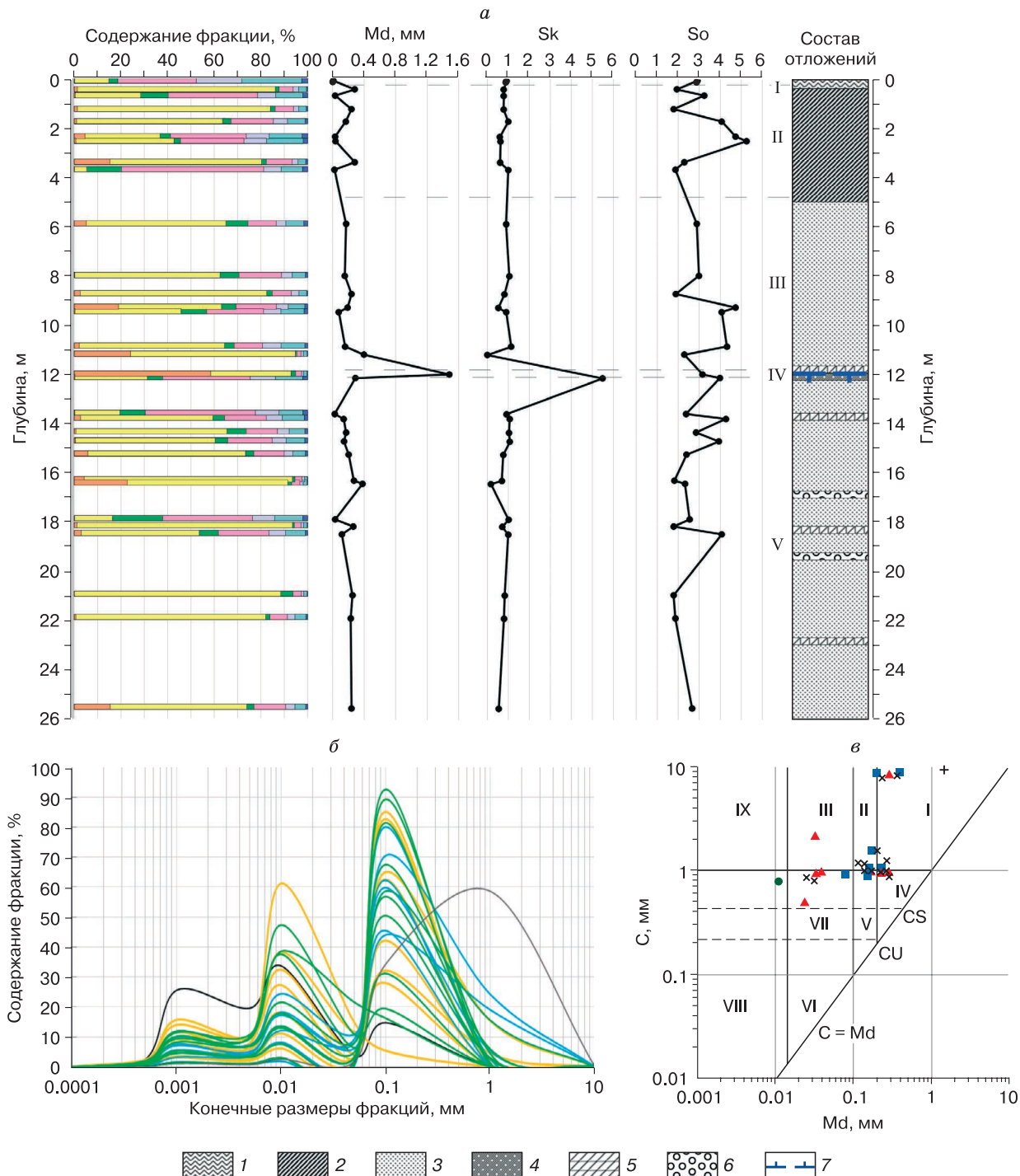


Рис. 3. Результаты анализа состава отложений Ивашкиной лагуны по скв. 1D-14.

а – состав отложений и их характеристики; 1 – ил, 2 – переслаивание песка и ила с косой слоистостью, 3 – песок мелкозернистый, 4 – песок гравелистый, 5 – детрит, 6 – гравий, 7 – граница ММП; б – логарифмические кривые распределения фракций; в – динамическая C–Md-диаграмма отложений. Остальные усл. обозн. см. на рис. 2.

Отложения слоев III и V на диаграмме расположены одинаково, большая часть точек соответствует зонам смещения осадков взвеси и перекаत्याвания. Слой IV располагается в секторе I, зоне осадков перекаत्याвания, волочения и сальтации.

Состав отложений скважины IV4-4

Слой I (0–3 м). Суглинок мерзлый, с преобладанием в составе глинистой и пылевой фракций (рис. 4, а). В верхних 0.15 м КТ массивная, ниже по разрезу до глубины 0.3 м – линзовидно-слоистая. В диапазоне глубин 0.3–0.8 м КТ меняется сверху вниз от сетчато-слоистой через сетчатую до линзовидно-слоистой. Ниже по разрезу в

выделенном слое КТ меняется от сетчато-слоистой до сетчатой. С глубины 1.3 до 3 м КТ крупно-сетчатая. Среднее значение $Md = 0.006$ мм, сортировка плохая, асимметрия неизменная в пределах слоя. Двухвершинный характер кривых распределения частиц в этих отложениях (см. рис. 4, б) аналогичен кривым распределения верхнего слоя илов в центральной части лагуны (см. рис. 2, б).

Слой II (3–9 м). Слой представлен преимущественно супесями, в верхней части вскрыт прослой песков мощностью 0.1 м, на глубине с 4 до 5 м залегает прослой суглинков. Состояние мерзлое. В верхней части слоя встречается большое количество наклонных прослоев растительного детрита

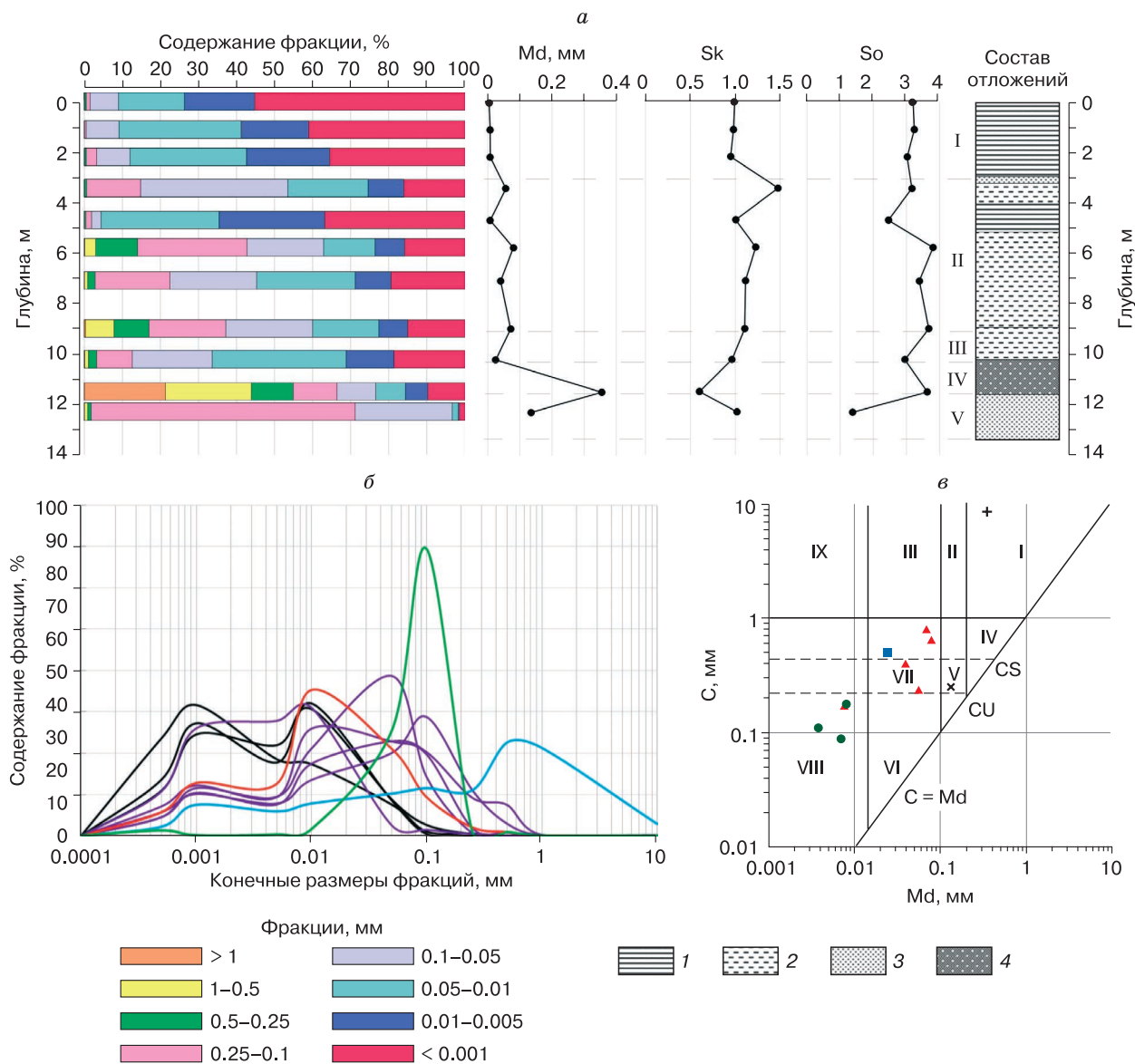


Рис. 4. Результаты анализа состава отложений Ивашкиной лагуны по скв. IV4-4 [Чеврев и др., 2007].

а – состав отложений и их характеристики; 1 – суглинок, 2 – супесь, 3 – песок мелкозернистый, 4 – песок гравелистый; б – логарифмические кривые распределения фракций; в – динамическая C–Md-диаграмма отложений. Остальные усл. обозн. см. на рис. 2.

та. На глубине около 6 м – пятна вивианита. Криогенная текстура линзовидно-слоистая и линзовидная, много наклонных шпиров. Среднее значение $Md = 0.046$ мм, на глубине 4.7 м уменьшается до 0.007 мм, характер кривой распределения частиц с этой глубины совпадает с отложениями слоя I. Снизу вверх по разрезу состав отложений меняется в сторону более тонких фракций, сортировка улучшается. Отложения выделенного слоя отличаются плохой сортировкой.

Слой III (9.0–10.2 м). Супесь пылеватая, мерзлая. Криогенная текстура линзовидно-слоистая и линзовидная, встречаются наклонные шпир. Здесь Md составляет 0.025 мм; сортировка средняя. Кривая распределения одновершинная с “хвостом”, вытянутым в сторону тонких фракций, преобладает пылеватая фракция.

Слой IV (10.2–11.5 м). Песок гравелистый, неоднородный, мерзлый. Криогенная текстура массивная. Значение Md составляет 0.355 мм (что в данном случае не показатель из-за высокой неоднородности состава). Кривая распределения фракций многовершинная, преобладают фракции песка и гравия. Сортировка плохая.

Слой V (11.5–13.3 м). Песок мелкозернистый, мерзлый, хорошо сортированный. Криогенная текстура массивная; Md составляет 0.135 мм. Кривая распределения имеет один выраженный пик.

Донные отложения слоя I по скв. IV4-4 располагаются на C–Md-диаграмме (см. рис. 4, в) в зоне осадков однородной взвеси. Отложения слоев II, III и V относятся к осадкам преимущественно взвеси и частично перекачивания. Отложения слоя IV относятся к зоне осадков перекачивания, волочения и сальтации (сегмент I).

РЕКОНСТРУКЦИЯ СЕДИМЕНТОГЕНЕЗА В ИВАШКИНОЙ ЛАГУНЕ

В результате анализа гранулометрического состава отложений Ивашкиной лагуны по трем скважинам были выделены три горизонта, отражающие различные обстановки осадконакопления (см. таблицу, рис. 5).

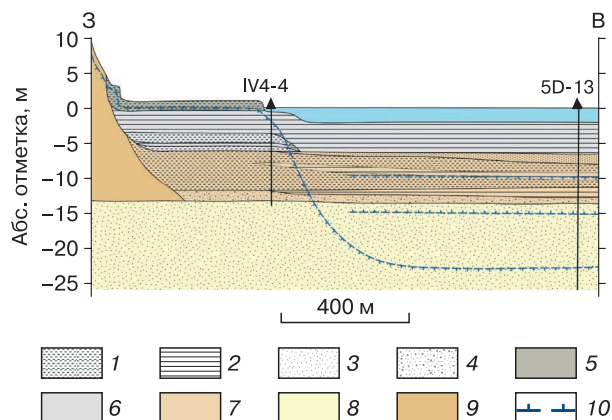


Рис. 5. Схематический разрез западной части котловины Ивашкиной лагуны.

1 – супесь; 2 – суглинок; 3 – песок; 4 – гравелистый песок; 5 – аласные отложения; 6 – горизонт I; 7 – горизонт II; 8 – горизонт III; 9 – ЛК; 10 – граница ММП.

Нижний горизонт III представлен аллювиальными ритмично-слоистыми песками, которые прослеживаются на всей территории Быковского полуострова и подстилают отложения ЛК. В скважине 1D-14 они вскрыты до глубины 35 м. Встречаются прослой гравия, тонкие прослой суглинков и растительного детрита. Среднее Md частиц составляет 0.214 мм, So меняется от хорошей до плохой, в среднем составляет 2.5. Согласно C–Md-диаграмме отложения горизонта III соответствуют области постоянных водотоков (рис. 6). Все указанные характеристики позволяют их соотнести с аллювиальными песками горизонта V в опорном разрезе “Раздельный” и “Мамонтовый”, выделенными Е.А. Слагодой. Эти же отложения выделяются в разрезе Уомулляхской лагуны и Песцового озера в [Jenrich et al., 2021].

Горизонт II представлен оттаявшими отложениями ЛК (таберальными голоценовыми образованиями) двух типов и преимущественно сохраняет его изначальный состав. Его мощность составляет 6–7 м.

Состав отложений Ивашкиной лагуны по скважинам 5D-13, 1D-14, IV4-4

Горизонт	Тип	Номер скв.	Слой	Глубина*, м	Мощность, м	Состав отложений
I	I	5D-13	I	0–4.6	4.6	Ил, суглинки
		IV4-4	I, II	0–6.0	6.0	
		1D-14	I	0–0.3	0.3	
II	II	1D-14	II	0.3–5.0	4.7	Песок, ил
		5D-13	II, III, IV	4.6–11.7	7.1	
II	II	IV4-4	II, III, IV	6.0–11.5	5.5	Пески, супеси, суглинки, гравелистые пески
		1D-14	III, IV	5.0–12.2	7.2	
III	III	5D-13	V	11.7–16.2	>4.5	Пески с прослоями гравия, суглинков
		IV4-4	V	11.5–13.3	>1.8	
		1D-14	V	12.2–25.5	>13.3	

* Глубина от дна лагуны.

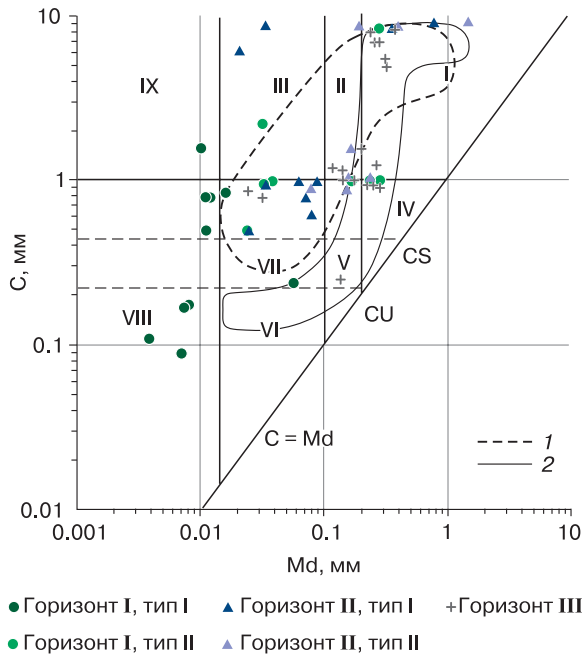


Рис. 6. Обобщающая C–Md-диаграмма отложений Ивашкиной лагуны.

1 – область отложений ЛК; 2 – область подстилающих ЛК аллювиальных песков. Римские цифры I–III для горизонтов соответствуют их номерам в таблице.

Тип I представлен песками, супесями и суглинками с включениями вивианита, подстилаемыми гравелистыми песками, встречается в скважинах 5D-13 и IV4-4. На C–Md-диаграмме они располагаются в зоне смешения частиц, транспортируемых преимущественно во взвеси и перекатом частиц, а также в зоне переката частиц, соответствующим области временных потоков. По составу эти отложения соответствуют горизонту IV ЛК разреза “Раздельный”.

Тип II охватывает отложения с глубины от 5 до 12.2 м по скв. 1D-14 и представлен мелкозернистыми песками, подстилаемыми гравелистыми песками с включениями детрита. В верхней части разреза S_o меняется от хорошей до плохой; Md составляет 0.189 мм. Положение на C–Md-диаграмме показывает формирование отложений в условиях временных потоков различной интенсивности. В целом, вместе с подстилающими их гравелистыми песками, они соответствуют отложениям, выделенным Е.А. Слагодой в составе IV типа ЛК разреза “Раздельный”. Как и отложения типа I, отложения типа II соответствуют характеристикам состава отложений ЛК и отражают их изначальные условия осадконакопления. От описанных ранее отложений ЛК их отличают более высокие значения S_o , а их криогенное строение – линзовидно-слоистые, линзовидные КТ, с наклонно залегающими шлирами [Чеве́рев и др.,

2007] – позволяет их охарактеризовать как таберальные образования.

Верхний горизонт I отражает историю развития самой Ивашкиной лагуны, в его пределах выделены два типа отложений. Тип I представлен озерно-лагунными илами и суглинками и встречается до глубин 5–6 м в центральной и западной частях лагуны и до глубины 0.3 м в северо-западной части лагуны. Среднее Md составляет 0.014 мм. На C–Md-диаграмме отложения располагаются в области спокойных вод. Преимущественно озерно-лагунный генезис отложений выделенного типа также подтверждается данными о содержании органического вещества [Чеве́рев и др., 2007; Сухове́рков и др., 2014; Погодаева и др., 2017; Гершелис и др., 2019], которые показывают, что его возрастание снизу вверх происходит с глубины 6–8 м.

Тип II встречается на северо-западе лагуны в разрезе скв. 1D-14 и представляет собой переслаивание песка и ила с косой слоистостью. Значение Md послойно меняется от 0.024 мм в илах до 0.282 мм в песках. Отложения могли быть сформированы, по-видимому, как в результате термоабразионного размыва берега и сноса материала из оврага, в пределах конуса выноса которого располагается скважина, так и в результате просадки отложений ЛК и перемешивания с ними донных отложений.

Анализ состава отложений Ивашкиной лагуны позволяет выделить три этапа развития ее котловины до затопления морем.

Этап 1. Формирование первичного термокарстового озера, при котором происходили оттаивание и просадка отложений ЛК. Отложения горизонта II сохраняют его литологический состав и представляют собой совокупность делювиально-пролювиальных отложений, накапливавшихся в предгорной части Хараулахского хребта, переработанных в подозерном талике. В северо-западной части лагуны (скв. 1D-14) в составе отложений этого горизонта преобладают более крупные фракции (тип I), чем в центральной и юго-западной (тип II).

Этап 2. Расширение термокарстового озера, в результате которого происходит накопление собственно озерных отложений. Морфология котловины (см. рис. 1, б) указывает на то, что западная часть современной акватории лагуны в прошлом была центральной частью термокарстового озера, а основная часть примесей крупных фракций привносится с размываемых берегов [Тумской, Левочкина, 2020]. Этот вывод подтверждается составом отложений: отложения первичного термокарстового озера по скв. IV4-4 имеют более тонкий состав, чем на других участках. В условиях активного расширения озера, вероятно, формировались отложения в северо-западной части озера,

темпы оттаивания отложений ЛК и их проседания на дне могут в некоторой степени опережать скорости осадконакопления, в результате чего образуется слой перемешанных осадков, формирующихся в озерных условиях и включающих в себя значительную часть привнесенного материала или проседающих подстилающих отложений. На этом этапе происходило развитие подозерного талика, реликт которого был вскрыт в центральной части лагуны на глубине 13.2–19.7 м.

Этап 3. Дренаживание термокарстового озера. Учитывая скорости отступления берега, вблизи которого расположена скважина IV4-4, верхний горизонт отложений еще за несколько лет до бурения существовал в субаэральных условиях. Современные аласные отложения, распространенные на этом участке, вероятно, были переотложены. На еще один этап дренаживания, более ранний, указывает прослой песков и супесей в озерных отложениях мощностью до 1 м, прослеживающийся по всем скважинам на глубине от 2.4 до 4.0 м. Эти отложения сформированы путем перекатывания частиц, а в западной части лагуны также характеризуются наличием прослоев растительного детрита, залегающих наклонно. Тот же прослой супесей и пылеватых песков в диапазоне глубин 3–4 м выделяется по скважинам IV4-2 [Чевеверев и др., 2007] и IV-99 [Schirrmeister et al., 2018]. Состав отложений Уомулляхской лагуны, расположенной к западу от Ивашкиной, также указывает на вероятность двух этапов ее дренаживания [Jenrich et al., 2021].

Первоначально предполагалось, что Ивашкина лагуна до затопления морем представляла собой озеро, в пределах которого сохраняется подозерный талик [Чевеверев и др., 2007], но в ходе бурения и термометрии в 2013–2014 гг. в ее центральной части было вскрыто два горизонта ММП. Верхний горизонт (глубина 7.8–13.2 м) в центральной части указывает на то, что котловина промерзала с поверхности после того, как была дренирована и превратилась в алас [Тумской, Левочкина, 2020]. В северной части лагуны кровля ММП залегает на глубине 12 м. Предполагается, что в этой части котловины перед затоплением моря сохранялось остаточное термокарстовое озеро.

В результате затопления морем котловины произошло преобразование озера в современную лагуны. Условная граница между озерными и собственно лагунными отложениями проводится авторами на глубине 2.5–3.0 м. Она слабо выражена в составе осадков, но выделена по присутствию морских фораминифер (определение Е.Ю. Галденковой) в верхних 2.5 метрах.

Современные лагунные отложения в значительной степени представляют собой переотложенные аласные и озерные отложения, поступающие в акваторию в результате размыва аласной

террасы. Изменения в современном составе отложений также в значительной степени могут определяться поступлением наносов через протоку в косе, отделяющей лагуны от моря.

Затопление морем котловины привело к оттаиванию верхнего горизонта отложений, но по мере обмеления лагуны происходит их переход в охлажденное состояние. В северо-западной части лагуны в настоящее время происходит ее расширение и углубление дна, но большая часть лагуны мелеет в условиях стабильного уровня моря и большого количества поступающего в нее материала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате статистического анализа состава отложений Ивашкиной лагуны впервые были сопоставлены данные бурения разных лет, что позволило выделить в ее пределах и охарактеризовать три горизонта отложений: аллювиальные отложения, таберальные образования, озерно-лагунные отложения. В горизонте озерно-лагунных отложений, которые ранее рассматривались как единый однородный слой, были выделены изменения в составе отложений, отражающие различные условия осадконакопления. Предполагается, что озеро дважды дренировалось до затопления морем. Для более детальной реконструкции условий развития Ивашкиной лагуны необходимо бурение с более частым отбором проб.

Анализ состава отложений Ивашкиной лагуны позволяет сделать следующие выводы:

- состав отложений Ивашкиной лагуны в значительной степени определяется составом и количеством поступающего с размываемых берегов материала, положением береговой линии;
- осадконакопление в условиях мелководной лагуны отличается от глубоководных озерных условий более высокой гидродинамической активностью, большими скоростями осадконакопления;
- аласные отложения в первоначальном виде в разрезе донных отложений лагуны не сохраняются, по мере расширения акватории они размываются и переоткладываются.

Благодарности. Работа выполнена в рамках НИОКТР 122011800064-9 (мерзлотно-геологический анализ и интерпретация данных) и при финансовой поддержке РФФ (грант № 21-77-30001). Статистическая обработка данных сделана в рамках Программы развития Томского государственного университета (Приоритет-2030).

Литература

Гершелис Е.В., Гончаров И.В., Дударев О.В. и др. Геохимические особенности органического вещества в донных отложениях лагуны Ивашкиной (Быковский полуостров, море Лаптевых) // Изв. Том. политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов, 2019, т. 330, № 3, с. 175–186.

ГОСТ 12536-79. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава. М., ИПК Изд-во Стандартов, 1980, 16 с.

Гроссгейм В.А. Методы палеогеографических реконструкций (при поисках залежей нефти и газа) / В.А. Гроссгейм, О.В. Бескровная, И.Л. Герашенко и др. Л., Недра, 1984, 271 с.

Данилов И.Д. Методика криолитологических исследований. М., Недра, 1983, 200 с.

Дегтяренко Ю.П., Пуминов А.П., Благовещенский А.В. Береговые линии восточно-арктических морей в позднем плейстоцене и голоцене // Колебания уровня морей и океанов за 15 000 лет. М., Наука, 1982, с. 179–185.

Каплина Т.Н. История мерзлых толщ Северной Якутии в позднем кайнозое // История развития многолетнемерзлых пород Евразии (на примере отдельных районов). М., Наука, 1981, с. 153–181.

Каплина Т.Н. Аласные комплексы Северной Якутии // Криосфера Земли, 2009, т. XIII, № 4, с. 3–17.

Каплина Т.Н., Ложкин А.В. Возраст “ледового комплекса” приморских низменностей Якутии // Изв. АН СССР. Сер. геогр., 1979, № 2, с. 83–95.

Касымская М.В. Субмаринные талики восточной части шельфа моря Лаптевых // Пространство и время, 2012, № 1 (7), с. 133–140.

Куницкий В.В. Криолитология низовьев Лены. Якутск, Ин-т мерзлотоведения СО АН СССР, 1989, 164 с.

Погода и климат: [сайт]: <http://www.pogodaiklimat.ru/history/21824.htm> (дата обращения: 11.05.2021).

Погодаева Т.В., Ходжер Т.В., Жученко Н.А. и др. Поступление органического вещества в залив Буор-Хая (море Лаптевых) // Геология и геофизика, 2017, т. 58, № 5, с. 739–752.

Рейнек Г.Э. Обстановки терригенного осадконакопления / Г.Э. Рейнек, И.Б. Сингх. М., Недра, 1981, 438 с.

Рекант П.В., Тумской В.Е., Гусев Е.А. и др. Распространение и особенности залегания субаквальной криолитозоны в районе банок Семеновская и Васильевская (море Лаптевых) по данным сейсмоакустического профилирования // Система моря Лаптевых и прилегающих морей Арктики: современное состояние и история развития. М., Изд-во Моск. ун-та, 2009, с. 332–348.

Романовский Н.Н. Эрозионно-термокарстовые котловины на севере приморских низменностей Якутии и Новосибирских островах // Мерзлотные исслед., 1961, вып. 1, с. 124–144.

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.

Романовский С.И. Седиментологические основы литологии. Л., Недра, 1977, 408 с.

Рубан А.С., Дударев О.В., Мазуров А.К., Панова Е.В. Обстановки современного осадкообразования на подводном береговом склоне губы Буор-Хая (море Лаптевых) // Изв. Том. политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов, 2017, т. 328, № 8, с. 83–93.

Слагода Е.А. Криолитогенные отложения Приморской равнины моря Лаптевых: литология и микроморфология. Тюмень, ИПЦ “Экспресс”, 2004, 120 с.

Суховерков С.В., Прокуда Н.А., Павлов А.Д., Сергиенко В.И. Использование пиролитической газовой хроматомасс-спектрометрии и двумерной газовой хроматомасс-спектрометрии для анализа органических соединений в донных осадках // Вестн. ДВО РАН, 2014, № 6, с. 151–159.

Тумской В.Е., Левочкина О.В. Ивашкина лагуна – история криолитогеоза // Устойчивость природных и технических систем в криолитозоне: Материалы Всерос. конф. с междунар. участием, посвящ. 60-летию образования Ин-та мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН (Якутск, 28–30 сент. 2020 г.). Якутск, Ин-т мерзлотоведения СО РАН, 2020, с. 188–192.

Тумской В.Е., Романовский Н.Н., Типенко Г.С. Формирование таликов под термокарстовыми озерами на северо-востоке Якутии: результаты моделирования // Материалы Второй конф. геофизиологов России (Москва, 6–8 июня 2001 г.). Т. 2. Динамическая геофизиология. М., Изд-во Моск. ун-та, 2001, с. 293–300.

Ульянцев А.С., Братская С.Ю., Дударев О.В. и др. Литолого-геохимическая характеристика морфолитогеоза в губе Буор-Хая // Океанология, 2020, т. 60, № 3, с. 407–417.

Ульянцев А.С., Братская С.Ю., Романкевич Е.А. и др. О гранулометрическом составе голоцен-плейстоценовых отложений моря Лаптевых (залив Буор-Хая) // Докл. РАН, 2016, т. 467, № 2, с. 206–210.

Фролов В.Т. Литология. Кн. 2. М., Изд-во Моск. ун-та, 1993, 432 с.

Чеверев В.Г., Видяпин И.Ю., Тумской В.Е. Состав и свойства отложений термокарстовых лагун Быковского полуострова // Криосфера Земли, 2007, т. XI, № 3, с. 44–50.

Bauch H., Mueller-Lupp T., Taldenkova E. et al. Chronology of the Holocene transgression at the North Siberian margin // Glob. Planet. Change, spec. iss., 2001, vol. 31 (1), p. 125–139.

Jenrich M., Angelopoulos M., Grosse G. et al. Thermokarst lagoons: A core-based assessment of depositional characteristics and an estimate of carbon pools on the Bykovsky Peninsula // Front. Earth Sci., 2021, vol. 9, 637899. DOI: 10.3389/feart.2021.637899.

Holmes M.L., Creager Y.S. Holocene history of the Laptev Sea continental shelf // Marine Geology and Oceanography of the Arctic Seas. Berlin, Heidelberg, Springer, 1974, Ch. 9, p. 211–230.

Passaga R., Byramjee R. Grain-size image of clastic deposits // Sedimentology, 1969, vol. 13, p. 233–252.

Schirmeister L., Grigoriev M.N., Strauss J. et al. Sediment characteristics of a thermokarst lagoon in the Northeastern Siberian Arctic (Ivashkina Lagoon, Bykovsky Peninsula) // Arktos, 2018, vol. 4 (1), p. 13.

Siegert C., Schirmeister L., Babiy O. The sedimentological, mineralogical and geochemical composition of Late Pleistocene deposits from the Ice Complex of the Bykovsky Peninsula, Northern Siberia // Polarforschung, 2002, vol. 70, p. 3–12.

References

Gershelis E.V., Goncharov I.V., Dudarev O.V. et al. Geochemical features of organic matter in bottom sediments of the Ivashkina Lagoon (Bykovsky Peninsula, Laptev Sea). Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georесursov [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Georesource engineering], 2019, vol. 330, No. 3, p. 175–186 (in Russian).

ГОСТ 12536-79. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава [Soils. Methods for laboratory analysis of grain and microaggregate composition]. Moscow, Izd-vo Standartov, 1980, 16 p. (in Russian).

Grossgejm V.A., Beskrovnaya O.V., Gerashchenko I.L. et al. Metody paleogeograficheskikh rekonstrukcij (pri poiskah zalezhej nefti i gaza) [Methods of paleogeographic reconstructions

- (when searching for oil and gas deposits)]. Leningrad, Nedra, 1984, 271 p. (in Russian).
- Danilov I.D. Metodika kriolitologicheskikh issledovaniy [Methodology of cryolithological studies]. Moscow, Nedra, 1983, 200 p. (in Russian).
- Degtyarenko Yu.P., Puminov A.P., Blagoveshchenskij A.V. Coastlines of the East Arctic Seas in the Late Pleistocene and Holocene. In: Fluctuations in the level of seas and oceans over 15 000 years. Moscow, Nauka, 1982, p. 179–185 (in Russian).
- Kaplina T.N. The history of the permafrost of Northern Yakutia in the Late Cenozoic. In: History of the development of permafrost of Eurasia (on the example of individual regions). Moscow, Nauka, 1981, p. 153–181 (in Russian).
- Kaplina T.N. Alas Complex of North Yakutia. Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere], 2009, vol. XIII, No. 4, p. 3–17 (in Russian).
- Kaplina T.N., Lozhkin A.V. The age of the Ice complex of the coastal lowlands of Yakutia. Izv. AN SSSR. Ser. geogr. [Proceedings of the Academy of Sciences of the USSR. Geography series], 1982, No. 2, p. 83–95 (in Russian).
- Kasym'skaya M.V. Submarine taliks of the eastern part of the Laptev Sea shelf. Prostranstvo i vremya [Space and Time], 2012, No. 1 (7), p. 133–140 (in Russian).
- Kunickij V.V. Kriolitologiya nizov'ev Leny [Cryolithology of the lower reaches of the Lena River]. Yakutsk, In-t Merzlotovedeniya SO AN SSSR, 1989, 164 p. (in Russian).
- Weather and climate: [website]: <http://www.pogodaiklimat.ru/history/21824.htm> (last visited: 11.05.2021).
- Pogodaeva T.V., Khodzher T.V., Zhuchenko N.A. et al. Input of organic matter to the Buor-Khaya Gulf (Laptev Sea). Russian Geology and Geophysics, 2017, vol. 58, No. 5, p. 739–752.
- Rejnek G.E., Singh I.B. Obstanovki terrigenogo osadkonakopleniya [Environments of terrigenous sedimentation]. Moscow, Nedra, 1981, 438 p. (in Russian).
- Recant P.V., Tumskoy V.E., Gusev E.A. et al. Distribution and peculiarity of bedding of the sub-sea permafrost near Semenovskoe and Vasilievskoe shoals (Laptev Sea) revealed by high-resolution seismic profiling. In: System of the Laptev Sea and the Adjacent Arctic Seas. Modern and Past Environments. Moscow, Moscow Univ. Press, 2009, p. 332–348 (in Russian).
- Romanovskii N.N. Erosion-thermokarst depressions in the north of the coastal lowlands of Yakutia and the New Siberian Islands. Merzlotnye issledovaniya [Permafrost Research], 1961, iss. 1, p. 124–144 (in Russian).
- Romanovskii N.N., Gavrilov A.V., Tumskoy V.E. et al. Thermokarst and its role in the formation of the near shore zone of the Laptev Sea shelf. Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere], 1999, vol. III, No. 3, p. 79–91 (in Russian).
- Romanovskij S.I. Sedimentologicheskie osnovy litologii [Sedimentological foundations of lithology]. Leningrad, Nedra, 1977, 408 p. (in Russian).
- Ruban A.S., Dudarev O.V., Mazurov A.K. et al. The conditions of modern sedimentation on the underwater coastal slope of Buor-Khaya Bay (Laptev Sea). Izvestiya Tomskogo politehnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesurov [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Georesource engineering], 2017, vol. 328, No. 8, p. 83–93 (in Russian).
- Slagoda E.A. Kriolitogennye otlozheniya Primorskoj ravniny morya Laptevyh: litologiya i mikromorfologiya [Cryolithogenic deposits of the Primorsky Plain of the Laptev Sea: lithology and micromorphology]. Tyumen, IPC "Ekspress", 2004, 120 p. (in Russian).
- Suhoverkov S.V., Prokuda N.A., Pavlov A.D. et al. Application of pyrolysis gas chromatography mass-spectrometry and two-dimensional gas chromatography mass-spectrometry for analysis of organic compounds in sea-floor sediments. Vestnik DVO RAN [FEB RAS Review], 2014, No. 6, p. 151–159 (in Russian).
- Tumskoy V.E., Romanovskii N.N., Tipenko G.S. Formation of taliks under thermokarst lakes in the North-East of Yakutia: modeling results. In: Proc. of the Second Conf. of Geocryologists of Russia (Moscow, June 6–8, 2001). Vol. 2. Dynamic geocryology. Moscow, Izd-vo Mosk. un-ta, 2001, p. 293–300 (in Russian).
- Tumskoy V.E., Levochkina O.V. Ivashkina Lagoon – the history of cryolithogenesis. In: Sustainability of natural and technical systems in the permafrost zone: Materials of the All-Russian Conf. with int. participation dedicated to the 60th anniversary of the formation of the Melnikov Permafrost Institute SB RAS (Yakutsk, Sept. 28–30, 2020). Yakutsk, IMZ SO RAN, 2020, p. 188–192 (in Russian).
- Ulyantsev A.S., Bratskaya S.Yu., Dudarev O.V., Semiletov I.P., Romankevich E.A. Lithological and geochemical characteristics of morpholithogenesis in the Buor-Khaya Bay. Oceanology, 2020, vol. 60, No. 3, p. 353–361.
- Ulyantsev A.S., Bratskaya S.Y., Romankevich E.A. et al. Particle size composition of Holocene–Pleistocene deposits of the Laptev Sea (Buor-Khaya Bay). Doklady Earth Sciences, 2016, vol. 467, No. 1, p. 241–245.
- Frolov V.T. Litologiya [Lithology]. Part 2. Moscow, Izd-vo Mosk. un-ta, 1993, 432 p. (in Russian).
- Cheverev V.G., Vidyapin I.Yu., Tumskoy V.E. Composition and characteristics of the thermokarst lagoon deposits, Bykovsky Peninsula. Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere], 2007, vol. XI, No. 3, p. 44–50 (in Russian).
- Bauch H., Mueller-Lupp T., Taldenkova E., Spielhagen R., Kassens H., Grootes P., Thiede J., Heinemeier J., Petryashov V. Chronology of the Holocene transgression at the North Siberian margin. Glob. Planet. Change, spec. iss., 2001, vol. 31 (1), p. 125–139.
- Jenrich M., Angelopoulos M., Grosse G., Overduin P.P., Schirrmeister L., Nitze I., Biskaborn B.K., Liebner S., Grigoriev M., Murray A., Jongejans L.L., Strauss J. Thermokarst lagoons: A core-based assessment of depositional characteristics and an estimate of carbon pools on the Bykovsky Peninsula. Front. Earth Sci., 2021, vol. 9, 637899. DOI: 10.3389/feart.2021.637899.
- Holmes M.L., Creager Y.S. Holocene history of the Laptev Sea Continental Shelf. In: Marine Geology and Oceanography of the Arctic Seas. Berlin, Heidelberg, Springer, 1974, Ch. 9, p. 211–220.
- Passega R., Byramjee R. Grain-size image of clastic deposits. Sedimentology, 1969, vol. 13, p. 233–252.
- Schirrmeister L., Grigoriev M.N., Strauss J., Grosse G., Overduin P.P., Kholodov A., Guenther F., Hubberten H.-W. Sediment characteristics of a thermokarst lagoon in the Northeastern Siberian Arctic (Ivashkina Lagoon, Bykovsky Peninsula). Arktos, 2018, vol. 4 (1), p. 13.
- Siegert C., Schirrmeister L., Babiy O. The sedimentological, mineralogical and geochemical composition of Late Pleistocene deposits from the Ice Complex of the Bykovsky Peninsula, Northern Siberia. Polarforschung, 2002, vol. 70, p. 3–12.

*Поступила в редакцию 7 октября 2022 г.,
после доработки – 22 декабря 2023 г.,
принята к публикации 24 декабря 2023 г.*