

УДК 552.3(985)

ЛИТОЛОГИЧЕСКИЕ И ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ПРИЗНАКИ ЛЕДОВОЙ ЭКЗАРАЦИИ В ГОЛОЦЕНОВЫХ ОСАДКАХ ВОСТОЧНО-СИБИРСКОГО МОРЯ

А.В. Алаторцев¹, А.Н. Колесник¹, С. Ши², Л. Ху³, В.Н. Карнаух¹, А.С. Астахов¹

¹Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН,
690041, Владивосток, ул. Балтийская, 43, Россия

²Первый институт океанографии МПР Китая, 266061, Циндао, Сяньсялин Роуд, 6, Китай

³Океанический университет Китая, 266100, Циндао, Сонлин Роуд, 238, Китай

В колонках донных осадков Восточно-Сибирского моря голоценового периода выявлены слои с текстурами перемешивания и слои, разделенные перерывами в осадконакоплении, соответствующие двум уровням моря — современному и более низкому раннеголоценовому. Слои отличаются резко выраженной хаотичной изменчивостью текстурного рисунка (пятнистость, разнонаправленная полосчатость), колориметрических и геохимических характеристик (пилообразные кривые распределения). Такой характер изменений связывается с ледовой экзарацией — механическим воздействием на морское дно льдов/айсбергов — и может использоваться при выявлении подобных слоев в других кернах региона с целью формирования представительной базы данных, прогнозирования и разработки мер по минимизации разрушительной деятельности льдов и айсбергов на морское дно в пределах арктического шельфа.

Ледовая экзарация, донные осадки, голоцен, литология, геохимия, Восточно-Сибирское море

LITHOLOGICAL AND GEOCHEMICAL INDICATORS OF ICE GOUGING: EVIDENCES FROM HOLOCENE SEDIMENTS IN THE EAST SIBERIAN SEA

A.V. Alatorsev, A.N. Kolesnik, X. Shi, L. Hu, V.N. Karnaukh, A.S. Astakhov

Cores of Holocene bottom sediment collected in the East Siberian Sea revealed layers with mixed textures and layers with breaks in sedimentation corresponding to the two sea levels defined as modern (upper) and Early Holocene (lower). The layers are characterized by distinctly chaotic variability in textural pattern (mottled appearance, multidirectional banding), colorimetric and geochemical parameters (sawtooth-like distribution curves). Such character of changes is associated with the physical action of dragging keels of ice/icebergs exerted on the seafloor and is referred to as ice gouging (scouring). Its analysis can be used for identification of ice scour-affected layers in other sediment cores collected in this region, and for the purpose of creating a representative database, predicting their occurrence and developing adequate measures to minimize the damaging impact from drifting sea ice and icebergs on the seafloor within the bounds of the Arctic shelf.

Ice gouging, bottom sediments, Holocene, lithology, geochemistry, East Siberian Sea

ВВЕДЕНИЕ

При активизации хозяйственной деятельности на шельфе Восточной Арктики, включающей поиск и разработку месторождений полезных ископаемых, прокладку трубопроводов и кабелей связи, налаживание транспортно-логистической системы Северного морского пути, все большее значение приобретает изучение процессов, определяющих динамику рельефа прибрежно-шельфовой зоны. Из-за преимущественной мелководности морских бассейнов Восточной Арктики важным является понимание и оценка интенсивности воздействия ледяных торосистых образований и айсбергов на дно с эрозией и перемешиванием донных осадков. Различные аспекты воздействия льдов на берега и дно арктических и субарктических морей рассмотрены в большом количестве публикаций [Barnes et al., 1984; Огородов, 2011; Rekant et al., 2015; Никифоров и др., 2019; Мазнев, Огородов, 2020]. Представляется, что эти процессы носят глобальный характер и проявляются повсеместно в бассейнах с постоянным или сезонным ледяным покровом. В то же время отражение их в строении и составе осадочного чехла современных шельфов рассматривается лишь в единичных случаях [Keskitalo et al., 2017]. В геологической литературе информация о формировании древних отложений в подобных условиях отсутствует.

Протяженный мелководный шельф Восточно-Сибирского моря обладает наиболее сложными ледовыми условиями. Основу ледяного покрова составляют многолетние льды, часто включающие так называемые стамухи — ледяные торосистые образования, сидящие на грунте или на мели [Гляциологический словарь, 1984]. С востока, со стороны Северной Америки, в Восточно-Сибирское море через

север Чукотского моря могут проникать дрейфующие ледяные поля, составленные многолетними льдами и айсбергами. Кили этих образований зачастую осуществляют механическое воздействие на дно мелководных участков моря перемешивая и/или удаляя слои осадков. В результате образуются борозды, а осадок, выдавленный килем ледовых образований при их движении, аккумулируется в боковых валах [Barnes et al., 1984; Rekant et al., 2015; Дударев и др., 2016; Никифоров и др., 2019; Мазнев, Огородов, 2020]. В керне GC58 (рис. 1) удаление слоев осадка происходило при глубине 52—54 м, что позволило авторам говорить об айсберговом воздействии [Keskitalo et al., 2017; Алаторцев и др., 2019]. Наиболее широкое развитие ледовая экзарация получила предположительно 12—10 тыс. л. н., когда внешний шельф Восточно-Сибирского моря находился в области распространения припайного льда [Дударев и др., 2016]. Достоверной информации о существовании современных крупных ледовых тел, способных изменить рельеф дна арктических морей, явно недостаточно, поэтому для обеспечения безопасности хозяйственной деятельности на шельфе целесообразным представляется выявление экзарационной деятельности льдов в прошлом и изучение условий их образования. Цель нашего исследования — изучить литолого-геохимические характеристики кернов донных осадков Восточно-Сибирского моря и выявить признаки прошлого ледового воздействия на дно.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Изучен 31 керн донных осадков из Восточно-Сибирского и Чукотского морей. Они были получены гравитационной трубкой в российско-китайской арктической экспедиции 77-го рейса НИС «Академик М.А. Лаврентьев» в 2016 г. (см. рис. 1). Предварительно для получения данных о структуре

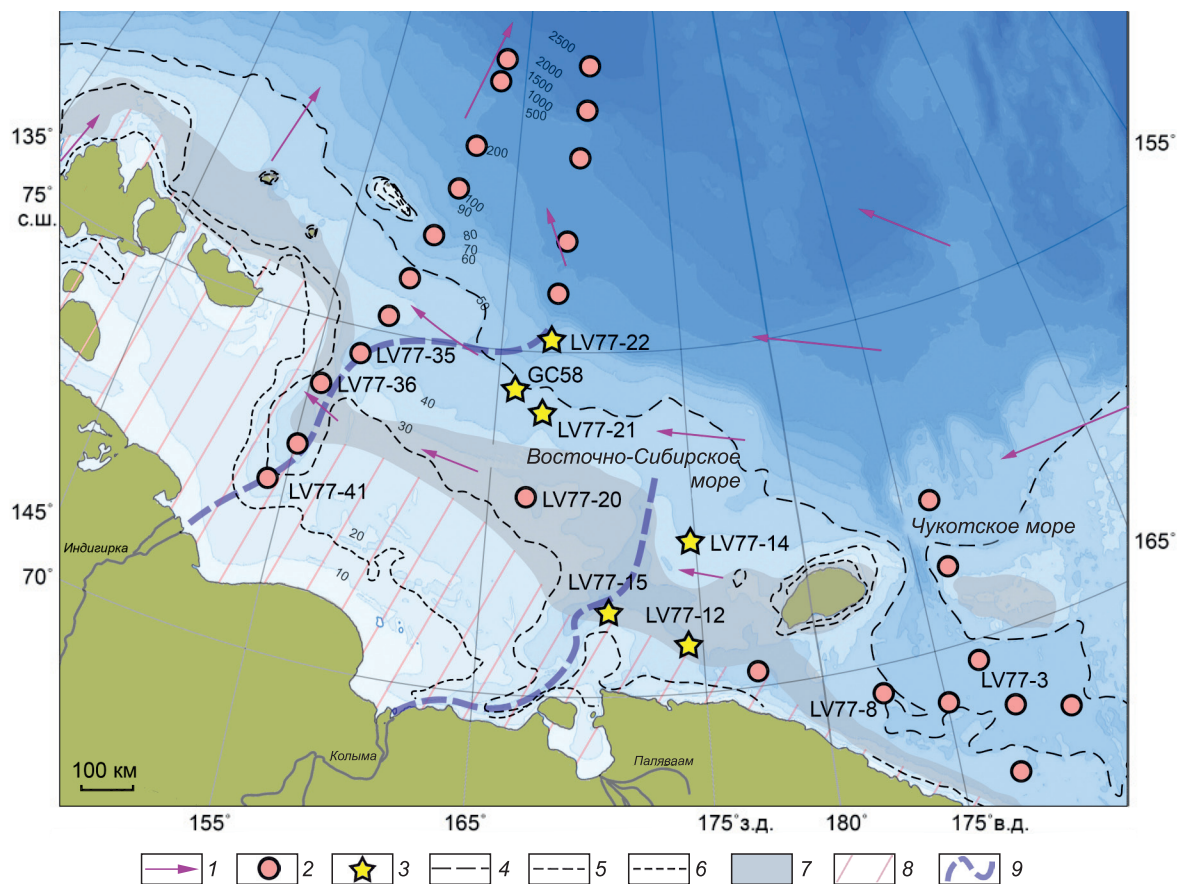


Рис. 1. Карта восточно-арктического шельфа с указанием точек отбора колонок и некоторыми элементами современных океанологических условий.

1 — направление переноса льдов [Serreze et al., 2016]; 2 — станции отбора кернов донных осадков; 3 — детально изученные керны донных осадков; 4—6 — древние береговые линии 12, 8.4 и 7.2 тыс. л. н. соответственно [Дударев и др., 2016]; 7 — область припая с ограниченным экзарационным воздействием ледяных торосистых образований, 8 — область дрейфующих льдов с интенсивным экзарационным воздействием на дно килей ледяных торосистых образований [Огородов, 2011]; 9 — палеодолины рек Индигирка и Колыма соответственно. В основе рисунка — Международная батиметрическая карта Северного Ледовитого океана [Jakobsson et al., 2012] с изобатами 10—100, 200, 500—2500 м.

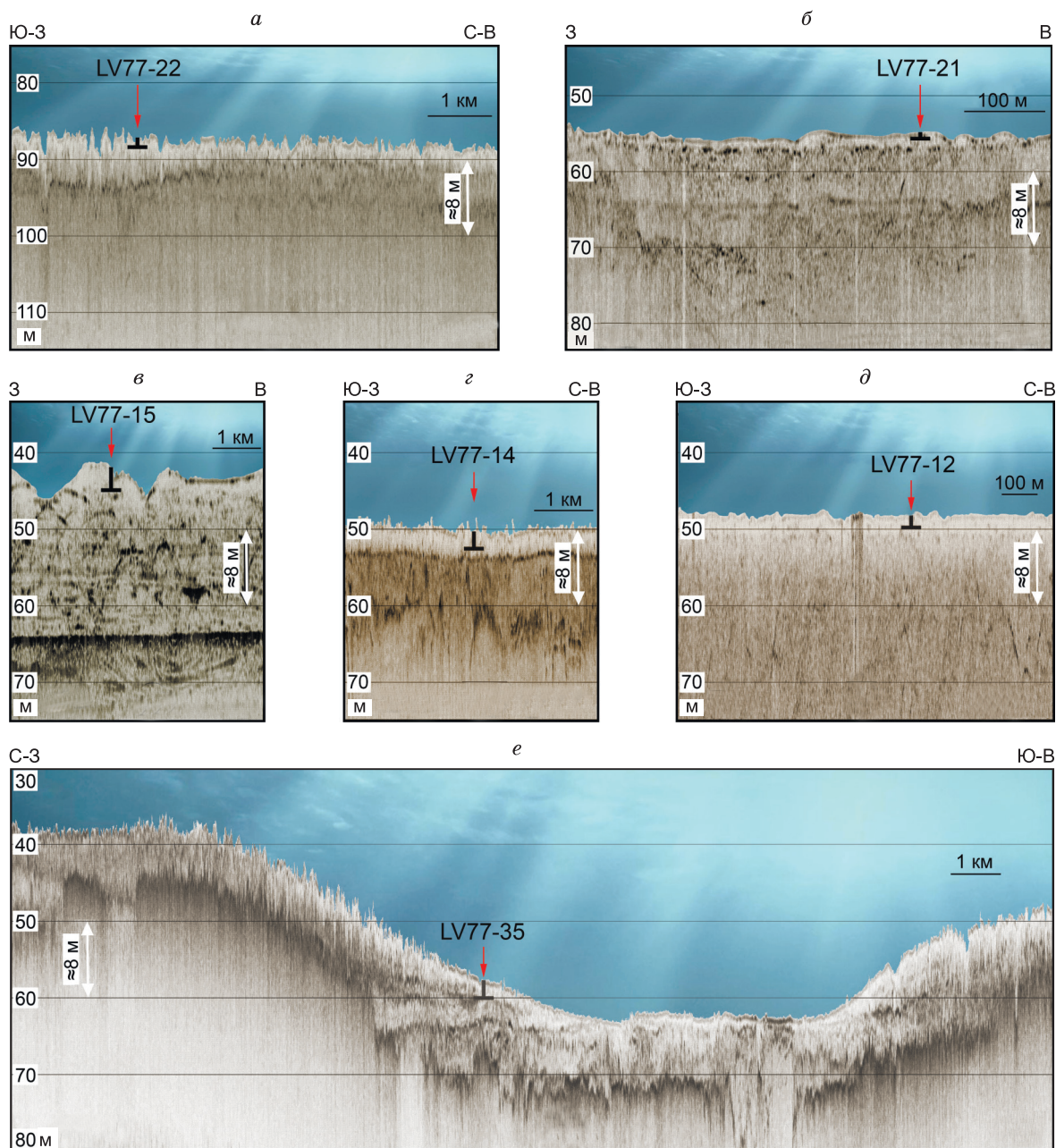


Рис. 2. Сейсмоакустические профили в районах отбора кернов донных осадков с указанием точек отбора и ориентировочной длины кернов относительно мощности осадочной толщи.

верхней части осадочного чехла и строении акустического фундамента с выбором точек для геологического опробования проводилось сейсмоакустическое профилирование с помощью высокочастотного профилографа GeoPulse (рис. 2).

Литологическое описание кернов донных осадков с составлением литологических схем выполнялось в экспедиционных условиях по общепринятой схеме сразу после выемки из пробоотборника и продольного распила метровых секций. Для фиксации текстуры и получения количественных характеристик цвета осадков на борту судна было организовано фотографирование кернов с помощью оригинальной колориметрической фотоустановки [Колесник и др., 2020; Колесник, Босин, 2021]. Работа проводилась в соответствии с международными стандартами [ISO 3664, 2009; ISO 3668, 2017]. Отбор проб осадков для определения влажности и плотности осуществлялся в экспедиционных условиях, само определение — в стационарной лаборатории стандартным весовым методом (лиофильная сушилка, аналитические весы).

**Радиоуглеродный измеренный и калиброванный возраст биогенного карбоната
(фрагменты раковин моллюсков) из кернов донных осадков Восточно-Сибирского моря,
содержащих следы ледовой экзарации**

Лаб. индекс образца	Керн	Интервал, см	AMS ¹⁴ C возраст, лет	Калиброванный возраст, лет до 1950 г.	Средний калиброванный возраст, тыс. лет до 1950 г.
Beta-478646	LV77-22	18	10030 ± 30	10568—10315	10.44
NSKA-1791		58	7712 ± 118	7371—7893	7.63
NSKA-1793		76	9459 ± 133	9290—10049	9.67
Beta-478645	LV77-15	246	3990 ± 30	3536—3343	3.44
Beta-478649	LV77-12	28—29	1380 ± 30	615—480	0.55
Beta-478650		64—65	1560 ± 30	750—605	0.68
Beta-478651		76—77	1550 ± 30	730—565	0.65
Beta-466789		99	3270 ± 30	2701—2443	2.57
NSKA-1786		100	3420 ± 84	2368—2876	2.62
Beta-466790		101	3270 ± 30	2701—2443	2.57
Beta-466791		121	3270 ± 30	2701—2443	2.57

Химический состав кернов осадков анализировался методом неразрушающего рентгенофлуоресцентного сканирования [Гуленко и др., 2020]. Измерения проводились с шагом 3 мм с помощью мобильного рентгенофлуоресцентного спектрометра Olympus Vanta (Olympus Scientific Solutions Americas, США).

Возраст осадков определялся методом AMS¹⁴C датирования в лаборатории Beta Analytic (США) и в ЦКП «Геохронология кайнозоя» Института археологии и этнографии СО РАН (таблица). Материал для анализа был получен из интервалов, обогащенных ракушей и раковинным детритом [Astakhov et al., 2023]. Калибровка с переводом радиоуглеродных дат в календарные выполнялась с помощью версии 8.2 программы Calib [Stuiver, Reimer, 1993] с использованием калибровочной кривой Marine13 [Reimer et al., 2013] и поправки на резервуарный эффект ΔR : 380 ± 20 [Heaton et al., 2020].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Керны осадков Восточно-Сибирского и Чукотского морей по результатам визуального описания на борту судна, анализа их литологических и геохимических характеристик разделились на две группы (см. рис. 1, 3). В первую группу вошла большая часть изученного материала как из Восточно-Сибирского (в основном западная часть), так и из Чукотского морей. В кернах осадков первой группы отмечается горизонтальная слоистость и закономерное, плавное изменение литологических и геохимических характеристик с типичным для самой верхней части разреза (поверхностный окисленный слой) пиком значений цветовой координаты a^* и обогащением редокс-чувствительными элементами Fe, Mn и S (элементами, существенно меняющими степень окисления при достижении определенного значения окислительно-восстановительного потенциала, что выражается в заметном изменении цвета осадка), уменьшением вниз по разрезу влажности и увеличением плотности, соответствием радиоуглеродных датировок нормальной (ненарушенной) последовательности напластования осадков.

Во вторую группу вошли пять кернов с отчетливыми признаками механического перемешивания осадков (пятнистая текстура, резкие, пилообразные вариации по разрезу значений колориметрических и геохимических характеристик) и перерывами в осадконакоплении, подтвержденными результатами радиоуглеродного датирования (см. рис. 3; таблицу). Все пять кернов отобраны в Восточно-Сибирском море, в восточном (большинство) и центральном районах (см. рис. 1). В юго-западной части района такие керны не выявлены, так как пробоотбор в зоне максимального экзарационного воздействия льдов (см. рис. 1, пр. LV77-41—LV77-35) осуществлялся по осевой части палеодолины р. Индигирка [Dong et al., 2022; Astakhov et al., 2023], защищенной от ледовой экзарации бортами долины (см. рис. 2, е). Керны, составившие вторую группу, стали основным объектом нашего исследования (см. рис. 3).

На сейсмоакустических профилях, полученных в экспедиции, отчетливо видно, что рельеф дна в местах отбора кернов второй группы отличается большой расчлененностью с многочисленными впадинами (бороздами) глубиной до 2—3 м и шириной до 10—20 м. Наиболее отчетливо это видно на рисунках 2, а, г, хотя при приведении к соответствующему масштабу такие же борозды проявляются на рисунках 2, б, д. В то же время в представленном масштабе на этих рисунках хорошо заметны отдельные боковые валы. Для более наглядной иллюстрации различий в микрорельефе дна районов, подверженных ледовой экзарации и без нее, приведен профиль через палеодолину р. Индигирка (см. рис. 2, е).

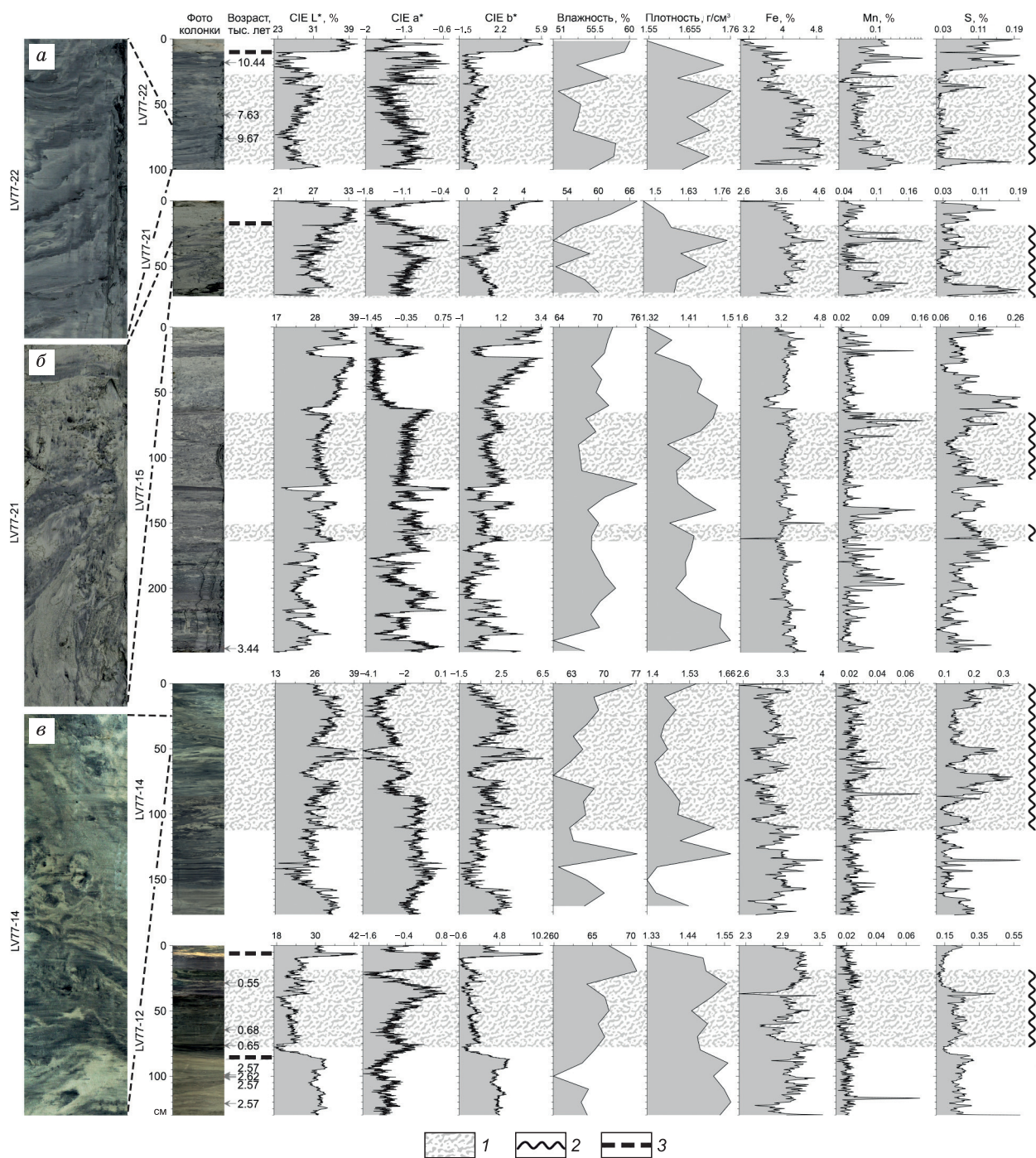


Рис. 3. Фотографии кернов донных осадков и графики наиболее вариативных характеристик — индикаторов ледового перемешивания.

а, б, в — фотографии участков керна в неискаженных пропорциях длины и ширины. 1, 2 — участки кернов со следами механического перемешивания осадочного материала; 3 — перерывы осадконакопления (удаление слоев осадков). Слева направо: абсолютный возраст датированных горизонтов, значения цветовых координат CIE L^* , a^* , b^* , естественная влажность и плотность, содержание редокс-чувствительных элементов — Fe, Mn, S.

В днище долины, где отобрана колонка LV77-35, вскрытая ненарушенные отложения с возрастом до 6.3 тыс. лет [Astakhov et al., 2023], борозды и боковые валы отсутствуют. На бортах долины, особенно на западном, открытом для прямого воздействия килей дрейфующих льдов (см. рис. 1), рельеф дна является типичным для районов ледового экзарационного воздействия. Несколько отличен он в районе отбора керна LV77-15 (см. рис. 2, в). Там проявлены борозды и боковые валы глубиной до 4—5 м при

ширине в сотни метров. Предполагается, что это следы воздействия на дно айсбергов, дрейфующих в составе паковых льдов со стороны Канадского архипелага [Keskitalo et al., 2017].

Керн LV77-22 длиной 100 см отобран в северной части Восточно-Сибирского моря с глубины 65 м. В керне хорошо различимы два слоя: 0—10 и 10—100 см. Верхний слой представлен разжиженным однородным относительно светлым ($L^* = 37.85\%$; здесь и далее по тексту приводятся средние значения) коричневатого-серым ($b^* = 4.51$) алевроитовым осадком (см. рис. 3). Нижний слой гораздо более темный ($L^* = 27.45\%$) и плотный. Он преимущественно серого цвета ($b^* = -0.46$) с большим количеством черных и темно-серых пятен, линз и прослоев с текстурами перемешивания. Распределение по керну редокс-чувствительных элементов (Fe, Mn, S) крайне вариативно. Датировки по ракушке (см. таблицу, рис. 3) указывают на то, что нижний слой представляет собой перевернутый и перемешанный осадок бокового вала экзарационной борозды, образовавшейся не ранее 7.6 тыс. л. н., когда уровень моря был на 15—20 м ниже современного [Дударев и др., 2016].

Керн LV77-21 длиной 73 см отобран в центральной части Восточно-Сибирского моря с глубины 43 м. В керне отчетливо просматриваются два слоя: 0—4 и 4—73 см. Верхний слой представлен жидким монотонным пелит-алевритовым осадком темно-серого цвета ($L^* = 26.92\%$) с желтым оттенком ($b^* = 4.01$). Нижний слой составлен гораздо более плотным осадком с характерными текстурами перемешивания — множество полос и пятен, расположенных под разными углами в хаотичном порядке. Распределение в нем редокс-чувствительных элементов (Fe, Mn, S), а также плотности и влажности позволяет предположить наличие обратной слоистости с нахождением осадков повышенной влажности и пониженной плотности, но с высоким содержанием марганца и серы сверху и внизу слоя (см. рис. 3). Ввиду отсутствия находок ракушки и раковинного детрита в осадках керна датировки получить не удалось.

Керн LV77-15 длиной 249 см отобран с глубины 34 м в восточной части Восточно-Сибирского моря на восточном борту палеодолины р. Колыма (см. рис. 1). Датировка, полученная с глубины 246 см (см. таблицу, рис. 3), свидетельствует об относительно высокой скорости осадконакопления. В керне по плотности осадка выделяются два слоя. Верхний 0—23 см представлен обводненным разуплотненным осадком оливково-серого цвета ($L^* = 38.84\%$, $b^* = 1.67$) с неясно выраженной слоистостью.

Нижний слой 23—249 см более плотный и темный ($L^* = 27.32\%$, $b^* = 1.34$). Выделяются несколько горизонтов с текстурами перемешивания, частично разуплотненных и включающих горизонты, обогащенные марганцем (см. рис. 3). Сложность текстурного рисунка объясняется множеством пятен и линз неправильной формы, ходов червей-илоедов и мелких волнистых и косых слойков. Распределение редокс-чувствительных (Fe, Mn, S) пилообразное.

Керн LV77-14 длиной 177 см отобран в восточной части Восточно-Сибирского моря с глубины 37 м. В керне выделяются два слоя: 0—131 и 131—177 см. Верхний слой плотный, с несколько разжиженной верхней частью. Осадок в пределах этого слоя имеет темно-серую окраску и пятнистую текстуру за счет большого количества беспорядочно расположенных черных и оливково-серых пятен и полос; обогащен серой (см. рис. 3). Нижний интервал менее плотный (см. рис. 3) сложен здесь темным ($L^* = 25.98\%$, $b^* = 0.89$) осадком, с тонкослоистой текстурой, обогащенным железом. Распределение других редокс-чувствительных элементов (Mn, S) варьирует в широких пределах без какой-либо определенной закономерности. Ракушка и раковинный детрит в осадках керна не обнаружены, но можно предполагать, что нижний слой более молодой по отношению к верхнему.

Керн LV77-12-3 длиной 130 см отобран в восточной части Восточно-Сибирского моря с глубины 37 м. В нем выделяются три слоя: 0—10, 10—78 и 78—130 см. Верхний слой разуплотненный с повышенным содержанием остатков диатомей хорошо определяется по оливково-серому цвету осадка (см. рис. 3). Средний слой плотный темно-серый хорошо выделяется по пониженным значениям цветовых параметров L^* и b^* (24.25 %, 1.35). В отдельных интервалах слоя прослеживаются текстуры перемешивания осадка. Нижний слой сложен плотным слоистым темно-серым с оливковым оттенком осадком, хорошо различимыми (см. рис. 3) по цветовым параметрам ($L^* = 29.94\%$, $b^* = 4.23$), повышенным содержанием серы. Полученные радиоуглеродные датировки (см. таблицу, рис. 3) дают возраст осадков нижнего слоя 2.57—2.62 тыс. лет; среднего — 0.55—0.68 тыс. лет. Согласно ранее выполненному датированию поверхностного слоя по ^{210}Pb [Астахов и др., 2021], он представлен современными осадками с возрастом до 0.3 тыс. лет. Таким образом, в керне прослеживаются выпадения слоев осадков с возрастом 0.3—0.5 и 0.6—2.5 тыс. лет.

ОБСУЖДЕНИЕ

Изученные нами донные осадки Восточно-Сибирского и Чукотского морей, судя по полученным радиоуглеродным датировкам, накапливались во время послеледниковой трансгрессии, когда уровень моря постепенно повышался до современного, установившегося 7—6 тыс. л. н. [Дударев и др., 2016] (см. рис. 1). Соответственно, все осадки должны иметь трансгрессивное строение с последовательной сменой снизу вверх мелководных отложений более глубоководными, как это отмечено, например, в

керна LV77-36 [Astakhov et al., 2023]. Подобная последовательность, в том числе отраженная литологическими и геохимическими характеристиками, прослеживается не везде, и одним из объяснений этого является ледовое/айсберговое перемешивание, отмеченное ранее в Восточно-Сибирском море [Keskitalo et al., 2017]. Нами признаки механического перемешивания осадков и удаление части разреза установлены в пяти кернах осадков Восточно-Сибирского моря (см. рис. 3).

Основными признаками механического воздействия на дно плавающих льдов, килей стамух и айсбергов являются специфические текстуры перемешивания осадка, наиболее хорошо проявляющиеся при первичном описании свежерезанного керна, и в основных чертах отражаемые фотографиями керна (см. рис. 3). Они проявляются в нарушении горизонтальной слоистости осадка, хаотичности напластования, разном наклоне слоев и линз, различающихся по цвету, разнонаправленной полосчатостью и др. По результатам инструментальных измерений, они проявляются в пилообразном, бессистемном распределении колориметрических и геохимических характеристик. Реже отмечается повторение слоев осадков с одними и теми же свойствами. По распределению марганца и цветовых характеристик L^* и a^* в керне LV77-22 слой с возрастом около 10 тыс. лет выделяется в верхней и нижней частях керна (см. рис. 3).

Можно выделить два основных типа перемешивания осадка при ледовой экзарации: с перемещением осадка в боковые валы борозд выпаживания, как это имело место в керне LV77-21 и, вероятно, в кернах LV77-22 и LV77-14, а также без перемещения осадка, только с нарушением его целостности и первичной текстуры. Второе, вероятно, имело место при формировании отдельных слоев керна LV77-12 и LV77-15 (см. рис. 3).

Выпадение из разреза отдельных слоев, которые формально могут рассматриваться как перерывы осадконакопления, возникает при механическом удалении льдами осадков из днища борозды выпаживания, а затем накопления нового слоя осадков более молодого возраста. Наиболее детально такие выпадения изучены в керне GC58 [Keskitalo et al., 2017], а по нашим данным, установлены и в керне LV77-12 (см. рис. 3). Максимальный перерыв в осадконакоплении (возраст слоя удаленных осадков) в керне GC58 составил 6.4 тыс. лет. Еще один тип перерывов осадконакопления связан с отсутствием осадконакопления на вершинах боковых валов борозд выпаживания в течение какого-то времени, необходимого для выравнивания возникшего при этом поднятия рельефа. Осадконакопление может возобновиться после заполнения борозды новыми осадками. При этом осадки, подстилающие новые слои, представлены перемешанными отложениями различного возраста, выброшенными из борозды и слагающими боковой вал. Такие перерывы осадконакопления предполагаются в кернах LV77-21 и LV77-22.

В Чукотском море и восточной части Восточно-Сибирского моря преобладает субширотный (с востока на запад) перенос многолетних льдов как часть круговорота Бофорта [Serreze et al., 2016], а в западной

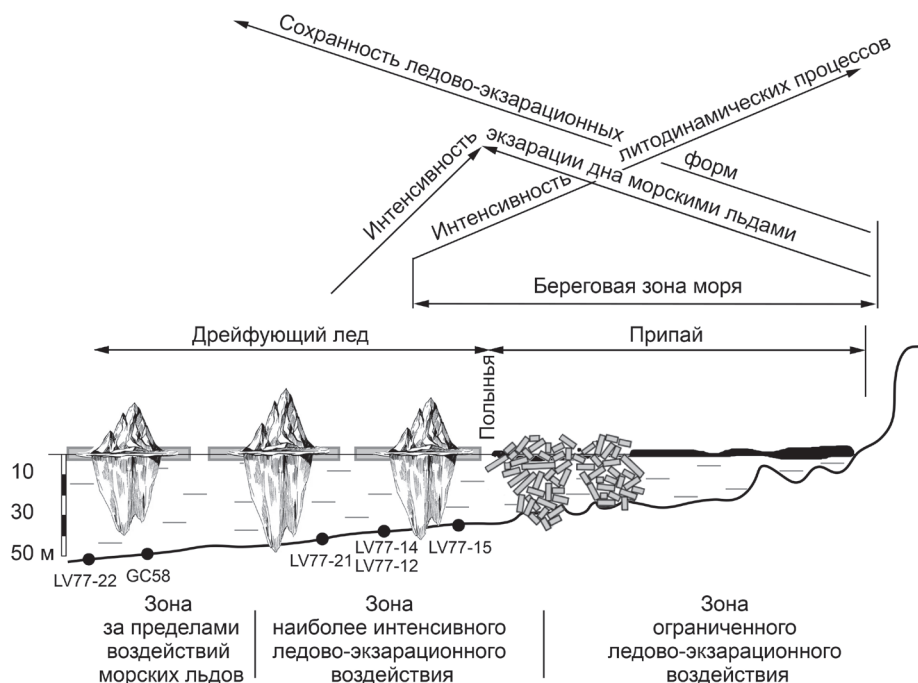


Рис. 4. Схема развития ледово-экзарационных и литодинамических процессов в береговой зоне Восточно-Сибирского моря с указанием глубины и точек отбора керна донных осадков.

части Восточно-Сибирского моря сменяется дрейфом в сторону Центральной Арктики (транспольярный перенос) (см. рис. 1). Глубина, на которой в Восточно-Сибирском море возможна экзарация дна морским льдом, достигает максимальных для арктических морей России значений 40—50 м [Огородов, 2011]. Наиболее интенсивное воздействие наблюдается в интервале глубин 20—30 м и связано с поясом торошения мористой кромки припая и дрейфующих паковых льдов, примыкающих к кромке припая (рис. 4). На больших глубинах торосистые образования просто не достают дна, на меньших же их движения ограничены слабой подвижностью припая. Большинство изученных нами кернов осадков (LV77-21, LV77-15, LV77-14, LV77-12), содержащих следы ледовой экзарации, отобраны именно с таких глубин. Можно предположить, что керн LV77-22 сформировался в условиях интенсивного экзарационного воздействия, происходившего 8—6 тыс. л. н. Об этом говорит наличие верхнего (до 10 см) разжиженного относительно окисленного слоя в кернах, имеющего желтовато-оливковый цвет (повышенные значения показателя $b^* \approx 4.508$ — самые высокие для изученных кернов) и повышенные относительно нижележащих слоев концентрации редокс-чувствительных Mn и S (см. рис. 3). В остальных кернах отсутствие признаков спокойного осадконакопления и расположение мест их отбора в пределах или вблизи современной зоны распространения активных экзарационных процессов (см. рис. 1, 4) позволяет предположить их формирование в более позднее, вплоть до настоящих дней, время голоценового периода, с активацией процесса после 6—7 тыс. лет, когда уровень моря наиболее приблизился к современному.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ особенностей литологических и геохимических признаков голоценовых осадков Восточно-Сибирского моря позволяет определить совокупность признаков, указывающих на факт существования воздействия крупных ледовых тел на морское дно. С учетом довольно высоких скоростей осадконакопления в голоценовый период и относительной однообразности природных условий показано, что помимо объективной доказательности метода радиоуглеродного датирования, высокоперспективным в выявлении признаков опасного природного явления — ледового выпаживания — является и высокоразрешающее изучение текстурно-колориметрических характеристик фотоизображений геологического материала, а также высокоразрешающего геохимического сканирования. Согласно нашим данным, наиболее интенсивному воздействию килей крупных ледовых тел на морское дно, юго-восточная часть моря подвергается в диапазоне глубин 30—40 м. При этом факт обнаружения признаков ледового воздействия на процесс осадконакопления в раннем и среднем голоцене позволяет сделать вывод, что послеледниковые изменения уровня моря в результате трансгрессии не приводили к увеличению или уменьшению интенсивности процесса ледовой экзарации, а лишь смещали ареал ее распространения вслед за отступающей границей сухопутной части континента. При этом, судя по всему, интервал наибольшего воздействия на глубине 30—40 м, по-видимому, был актуален не только в позднем, но и в раннем и среднем голоцене.

Авторы признательны за помощь в выполнении исследований команде НИС «Академик М.А. Лаврентьев» и научному составу 77-го рейса.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (грант 21-17-00081). Экспедиционные работы выполнялись при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (проект 121021700342-9) и гранта провинции Шаньдун КНР для Национальной лаборатории морских наук и технологий в Циндао (грант 2018SDKJ0104-3).

ЛИТЕРАТУРА

Алаторцев А.В., Астахов А.С., Колесник А.Н. Литолого-геохимические признаки ледового/айсбергового перемешивания верхнечетвертичных отложений Восточно-Сибирского моря // Геология морей и океанов. Материалы XXIII Международной научной конференции (школы) по морской геологии. М., ИО РАН, 2019, т. 2, с. 17—21.

Астахов А.С., Калугин И.А., Ши Сюефа, Аксентов К.И., Дарьин А.В., Ху Лимин, Бабищ В.В., Мельгунов М.С., Плотников В.В. Роль ледяного покрова в формировании химического состава донных осадков восточно-арктического шельфа // Геохимия, 2021, т. 66, № 6, с. 526—540.

Гляциологический словарь / Ред. В.М. Котляков. Л., Гидрометеиздат, 1984, 564 с.

Гуленко Т.А., Волков В.Г., Лопатников Е.А. Сканирующее устройство экспресс-анализа кернов. Патент на полезную модель RU 197194 U1, 10.04.2020. Заявка № 2020101560 от 15.01.2020.

Дударев О.В., Чаркин А.Н., Шахова Н.Е., Мазуров А.К., Семилетов И.П. Современный литоморфогенез на восточно-арктическом шельфе России. Томск, Изд-во ТПУ, 2016, 192 с.

Колесник А.Н., Босин А.А. Мобильное устройство для определения цветовых характеристик горных пород. Патент на изобретение RU 2741268 C1, 22.01.2021, бюл. № 3. Заявка № 2020115938 от 20.04.2020.

- Колесник А.Н., Босин А.А., Колесник О.Н., Янченко Е.А., Василенко Ю.П.** Новая методика получения количественных данных о цвете морских осадков // ДАН, 2020, т. 495, № 1, с. 53—58.
- Мазнев С.В., Огородов С.А.** Воздействие ледяных образований на берега и дно мелководных морей и крупных озер умеренных и субарктических широт // Лед и снег, 2020, т. 60, № 4, с. 578—591.
- Никифоров С.Л., Ананьев Р.А., Либина Н.В., Дмитриевский Н.Н., Лобковский Л.И.** Ледовая эрозия на арктическом шельфе России // Океанология, 2019, т. 59, № 3, с. 466—468.
- Огородов С.А.** Роль морских льдов в динамике рельефа береговой зоны. М., Изд-во Моск. ун-та, 2011, 173 с.
- Astakhov A.S., Babich V.V., Xuefa Shi, Limin Hu, Obrezkova M.S., Aksentov K.I., Alatorsev A.V., Darin A.V., Kalugin I.A., Karnaukh V.N., Melgunov M.S.** Climate and ice conditions of East Siberian Sea during Holocene: Reconstructions based on sedimentary geochemical multiproxy // Holocene, 2023, v. 33 (1), p. 3—13.
- Barnes P.W., Rearic D.M., Reimnitz E.** Ice gouging characteristics and processes // The Alaskan Beaufort Sea: Ecosystems and Environments / Eds. P.W. Barnes, D.M. Schell, E. Reimnitz. Acad. Press Inc., Orlando, FL, 1984, p. 185—212.
- Dong J., Shi X., Gong X., Astakhov A.S., Hu L., Liu X., Yang G., Wang Y., Vasilenko Yu., Qiao S., Bosin A., Lohmann G.** Enhanced Arctic sea ice melting controlled by larger heat discharge of mid-Holocene rivers // Nat. Commun., 2022, v. 13, 5368.
- Heaton T., Köhler P., Butzin M., Bard E., Reimer R., Austin W., Ramsey C.B., Grootes P.M., Hughen K.A., Kromer B., Reimer P.J., Adkins J., Burke A., Cook M.S., Olsen J., Skinner L.C.** Marine20—the Marine Radiocarbon Age Calibration Curve (0–55,000 cal BP) // Radiocarbon, 2020, v. 62 (4), p. 779—820.
- ISO 3664** Graphic technology and photography — Viewing conditions, 2009, 34 p.
- ISO 3668** Paints and varnishes — Visual comparison of colour of paints, 2017, 8 p.
- Jakobsson M., Mayer L.A., Coakley B., Dowdeswell J.A., Forbes S., Fridman B., Hodnesdal H., Noormets R., Pedersen R., Rebesco M., Schenke H.-W., Zarayskaya Yu., Accettella A., Armstrong A., Anderson R.M., Bienhoff P., Camerlenghi A., Church I., Edwards M., Gardner J.V., Hall J.K., Hell B., Hestvik O., Kristoffersen Y., Marcussen C., Mohammad R., Mosher D., Nghiem S.V., Pedrosa M.T., Travaglini P.G., Weatherall P.** The international bathymetric chart of the Arctic Ocean (IBCAO), Version 3.0 // Geophys. Res. Lett., 2012, v. 39 (12), p. 1—6.
- Keskitalo K., Tesi T., Bröder L., Andersson A., Pearce C., Sköld M., Semiletov I.P., Dudarev O.V., Gustafsson Ö.** Sources and characteristics of terrestrial carbon in Holocene-scale sediments of the East Siberian Sea // Clim. Past, 2017, v. 13 (9), p. 1213—1226.
- Reimer P., Bard E., Bayliss A., Beck J., Blackwell P., Ramsey C., Buck C.E., Cheng H., Edwards R.L., Friedrich M., Grootes P.M., Guilderson T.P., Hafliðason H., Hajdas I., Hatté C., Heaton T.J., Hoffmann D.L., Hogg A.J., Hughen K.A., Kaiser K.F., Kromer B., Manning S.W., Mu Niu, Reimer R.W., Richards D.A., Scott E.M., Southon J.R., Staff R.A., Turney C., van der Plicht J.** IntCal13 and Marine13 Radiocarbon Age Calibration Curves 0–50,000 years cal BP // Radiocarbon, 2013, v. 55 (4), p. 1869—1887.
- Rekant P., Bauch H.A., Schwenk T., Portnov A., Gusev E., Spiess V., Cherkashov G., Kassens H.** Evolution of subsea permafrost landscapes in Arctic Siberia since the Late Pleistocene: a synoptic insight from acoustic data of the Laptev Sea // Arktos, 2015, v. 1 (11), 15 p.
- Serreze M.C., Crawford A.D., Stroeve J.C., Barrett A.P., Woodgate R.A.** Variability, trends, and predictability of seasonal sea ice retreat and advance in the Chukchi Sea // J. Geophys. Res.: Oceans, 2016, v. 121 (10), p. 7308—7325.
- Stuiver M., Reimer P.J.** Extended ^{14}C data base and revised CALIB 3.0 ^{14}C age calibration program // Radiocarbon, 1993, v. 35 (1), p. 215—230.