

Научная статья
УДК 551.352
doi:10.37614/2949-1185.2023.2.3.012

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ХРОНОЛОГИИ ОСАДКОНАКОПЛЕНИЯ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ ВПАДИНЕ БАРЕНЦЕВА МОРЯ

Ирина Сергеевна Усягина^{1✉}, Никита Игоревич Мещеряков², Наталья Сергеевна Иванова³
^{1–3}Мурманский морской биологический институт Российской академии наук, г. Мурманск, Россия
¹usjagina@mmbi.info[✉], ²mescheriakov@mmbi.info, ³ivanova_ns@mmbi.info

Аннотация

Представлены результаты исследований ядра донных отложений из Центральной впадины Баренцева моря, отобранного в экспедиции на НИС “Дальние Зеленцы” в 2022 г. Вскрытая осадочная толща сложена алеврито-пелитовым материалом с примесью в отдельных слоях разномерного песка и хорошо окатанного гравия. По изменению удельной активности избыточного ²¹⁰Pb определена хронология накопления осадков. Полученные данные верифицированы с помощью ¹³⁷Cs. Темпы осадконакопления в исследуемом районе за последние 120 лет изменяются в пределах 0.05–0.1 см/год.

Ключевые слова:

Баренцево море, седиментация, хронология осадконакопления, ²¹⁰Pb, ¹³⁷Cs

Original article

PRELIMINARY RESULTS OF THE STUDY OF SEDIMENTATION IN THE CENTRAL DEPRESSION OF THE BARENTS SEA

Irina S. Usyagina^{1✉}, Nikita I. Mescheriakov², Natalia S. Ivanova³
^{1–3}Murmansk Marine Biological Institute of the Russian Academy of Sciences, Murmansk, Russia
¹usjagina@mmbi.info[✉], ²mescheriakov@mmbi.info, ³ivanova_ns@mmbi.info

Abstract

The article represents the results of the study of bottom sediment cores taken from the R/V “Dalnie Zelentsy” in the Central Depression of the Barents Sea during the 2022 expedition. The exposed stratum of bottom sediments is composed of silty-pelitic material, in some layers there is an admixture of uneven-grained sand and grains of well-rounded gravel. The chronology of sedimentation was determined by changing the specific activity of excess ²¹⁰Pb, the obtained data were verified by ¹³⁷Cs. The rate of sedimentation in the study area over the past 120 years has varied within 0.05–0.1 cm/year.

Keywords:

Barents Sea, sedimentation, sedimentation chronology, ²¹⁰Pb, ¹³⁷Cs

Введение

Донные отложения Баренцева моря относятся к типу гляциально-морских, т. е. состоят из зерен самой разнообразной величины преимущественно минерального происхождения (Кленова, 1937). Их накопление в той или иной части бассейна напрямую зависит от климатических условий и океанологических процессов в регионе (Кленова, 1960; Zaborskaya et al., 2006; Лисицын, 2010; Chronology ..., 2021). Поэтому осадочная толща Баренцева моря содержит важную историческую информацию об условиях седиментации в бассейне. Размерный состав зерен, слагающих осадочную толщу, и скорость их накопления служат индикаторами условий седиментации в тот или иной хронологический период. Наиболее показательными для исследования седиментации в морских бассейнах являются отрицательные формы рельефа дна – впадины и котловины, не испытывающие размывающего воздействия придонных течений, перемешивания и перераспределения осадочного вещества. Эти формы рельефа дна являются седиментационными ловушками (Митяев и др., 2007) и, как следствие, наиболее информативны для характеристики условий осадконакопления в бассейне. Значимый научный интерес для исследования хронологии осадконакопления Баренцева моря представляет Центральная впадина. Она охватывает наибольшие глубины в восточной части моря и является его самой большой по площади и глубине (> 300 м) депрессией донного рельефа.

Цель настоящей работы – анализ хронологических и литологических данных об осадочной толще и выявление особенностей современной седиментации в Центральной впадине.

Центральная впадина Баренцева моря оконтурена изобатой 300 м и имеет максимальную глубину 386 м. Она простирается к западу от Западно-Новоземельского желоба, на юге граничит с Мурманской, Северо-Канинской и Гусиной банками, на западе ограничена Центральным плато и Центральной возвышенностью. Над впадиной расположена зона смешения теплых и холодных вод (Матишов и др., 2010).

В голоцене в Центральной впадине отмечено накопление осадков в основном пелитовой и алевроитовой размерности с примесью более грубых фракций. Мощность голоценовых отложений составляет приблизительно 2.5 м (Facies ..., 2006; Murdmaa, Ivanova, 2017).

Материал и методы

Пробы отбирали в Баренцевом море в экспедиции на НИС “Дальние Зеленцы” в феврале–марте 2022 г. Отбор проводили с помощью трубки ГОИН 1.5 в точках, где предположительно не происходит размыва поверхностного слоя донных отложений, чтобы соблюдалось условие постоянного потока взвешенного вещества, требуемое при проведении датирования по избыточному ^{210}Pb . Точки отбора проб показаны на рис. 1. В настоящей работе представлены предварительные результаты исследования донных отложений Центральной впадины Баренцева моря. В основу легли данные анализа грунтовой колонки из самой глубокой точки ст. 43, наиболее полно отражающие динамику седиментационных процессов в данной депрессивной форме рельефа. Для анализа были взяты две колонки ненарушенных донных отложений мощностью 30 см, отобранных с глубины 385 м. Колонки были разделены на тонкие слои, достаточные для обеспечения приемлемого временного разрешения интервалов датирования и для определения типов донных отложений.

Первичную обработку проб проводили на борту НИС “Дальние Зеленцы”. Для определения удельной активности общего ^{210}Pb и ^{137}Cs , необходимых при расчете возраста вскрытой осадочной толщи, верхнюю часть керна от 0 до 15 см разделяли на слои с дискретностью 1 см, с 15 по 30 см – с дискретностью 2 см. Керн, предназначенный для гранулометрического анализа, разделяли на слои по 2 см. Подготовленные к дальнейшему анализу пробы запечатывали в герметичную тару, замораживали при температуре $-18\text{ }^\circ\text{C}$, а затем доставляли в лабораторию ММБИ РАН.

В лаборатории перед проведением гамма-спектрометрического анализа все исследуемые образцы осадков сушили при комнатной температуре, измельчали и выдерживали не менее 30 сут. в герметично закрытых сосудах для обеспечения равновесия между ^{226}Ra и ^{222}Rn . Радиометрический анализ проб проводили в этих же сосудах после достижения равновесия. Время измерения – 85000 с, что обеспечивает погрешность измерений от 5 до 15 % в верхних слоях кернов.

Удельную активность ^{210}Pb и ^{137}Cs определяли на многоканальном гамма-спектрометре “Canberra” (США) для измерения рентгеновского и гамма-излучения со свинцовой экран-защитой детектора. В качестве регистрирующей части использовался широкополосный детектор из особо чистого германия планарного типа BE5030 с входным окном из “carbon epoxy” толщиной 0.6 мм и диаметром кристалла 80 мм, позволяющим регистрировать гамма-кванты с энергией от 3 КэВ до 3 МэВ. Сбор спектральной информации осуществляли на анализаторе импульсов DSA-1000 (США) с разрешением 16К каналов, соответствующем современной технологии цифровой обработки сигналов. Обработку спектров и идентификацию радионуклидов проводили с помощью программного обеспечения Genie-2000 (версия 3.3). Активность $^{210}\text{Pb}_{\text{изб}}$ была скорректирована на дату сбора керна, а результаты указываются в пересчете на сухую массу с поправкой на самопоглощение и геометрию образца.

Датирование донных отложений проводили по неравновесному (избыточному) ^{210}Pb . Природный радионуклид ^{210}Pb , период полураспада ($T_{1/2}$) 22.3 г. – член цепи распада ^{226}Ra ($T_{1/2} = 1600$ лет), который образуется при последовательном распаде материнского изотопа ^{238}U . В донных отложениях ^{210}Pb состоит из равновесного ^{210}Pb , который непрерывно образуется и предположительно находится в вековом равновесии со своим исходным радионуклидом ^{226}Ra , и неравновесного ^{210}Pb , поступающего на поверхность водных объектов и окружающую их водосборную площадь и, как

следствие, в донные отложения, в результате атмосферного осаднения. Неравновесный ^{210}Pb определяют путем вычитания из общей активности ^{210}Pb равновесной активности (активности ^{226}Ra) и используют для определения возраста осадков и скорости осадконакопления в бассейне седиментации.

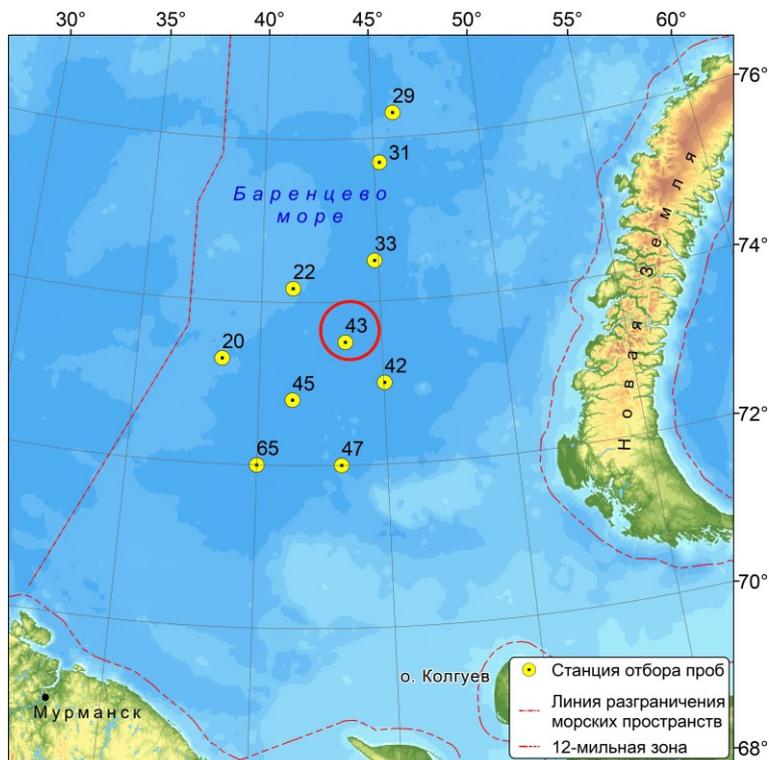


Рис. 1. Карта-схема отбора проб в районе работ
Fig. 1. Map-scheme of sampling sites

Рассчитанный возраст осадочных горизонтов уточняли по удельной активности техногенного радионуклида ^{137}Cs , который накапливался в донных отложениях с потоком взвеси. Хроностратиграфический маркер ^{137}Cs применяется для датирования кернов донных отложений в Арктике, так как выпадение радиоактивных осадков в результате атмосферных испытаний ядерного оружия имело место в глобальном масштабе, а наличие пиков концентрации в большинстве случаев позволяет сопоставить дату загрязнения с известной датой события.

Гранулометрический анализ выполняли по методу, разработанному Всероссийским научно-исследовательским институтом геологии и минеральных ресурсов Мирового океана (ВНИИОкеангеологии) без химического воздействия на донные отложения (Андреева, Лапина, 1998). Пробы высушивали при температуре $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ до постоянной массы. Высушенные образцы заливали дистиллированной водой и кипятили в течение 30 мин. Полученную суспензию растирали резиновым пестиком, после чего вновь заливали дистиллированной водой ($T = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$) и охлаждали до комнатной температуры. Разделение размерных фракций в пробах проводили согласно этапам, указанным в методике. Удаление фракции пелита (< 0.01) контролировали под микроскопом. Тип донных отложений определяли по классификации, разработанной ВНИИОкеангеология. Потерю при прокаливании (ППП) определяли как разницу между массой пробы до и после прокалывания в муфельной печи при температуре $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ до постоянной массы. Изменение массы образца косвенно показывает количество удаленного из пробы органического вещества.

Результаты и обсуждение

Хронология осадконакопления. Результаты измерений удельной активности общего ^{210}Pb в слоях керна от 0 до 11 см показало снижение значений от 290 до 59.7 Бк/кг, которое описывается экспоненциальной кривой (рис. 2). Во всех последующих горизонтах мы наблюдали незначительные колебания этого показателя, средняя удельная активность для разделенных горизонтов с 11 до 30 см вскрытой осадочной толщи составляла 56.9 ± 5.0 Бк/кг. Согласно методическим рекомендациям расчета возраста в морских осадках (Sanchez-Cabeza, Ruis-Fernandes, 2012), отсутствие дальнейшего снижения общего ^{210}Pb в нижних слоях колонки свидетельствует о том, что в этих слоях ^{210}Pb находится в равновесии со своим исходным радионуклидом ^{226}Ra . Исходя из этого, среднюю удельную активность равновесного ^{210}Pb принимают равной ^{226}Ra , и в дальнейшем рассчитывают удельную активность неравновесного ^{210}Pb , вычитая это значение (в нашем случае оно составляет 56.9 ± 5.0 Бк/кг) из общей активности ^{210}Pb в каждом слое колонки.

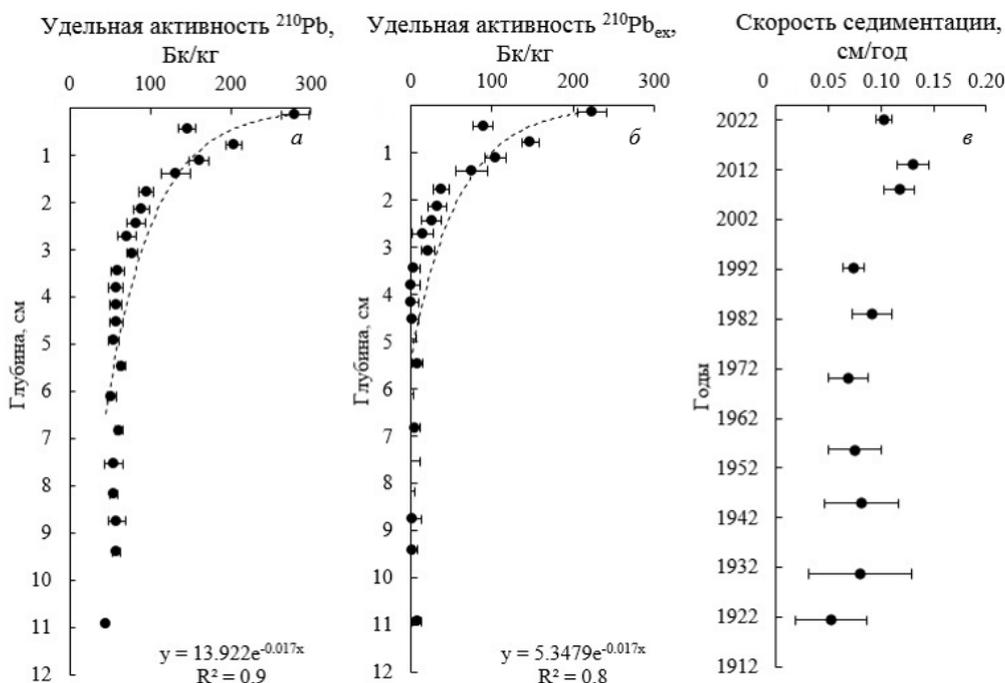


Рис. 2. Удельная активность ^{210}Pb (общего) (а), $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ (избыточного) (б) в осадочных горизонтах керна и скорость седиментации (в)

Fig. 2. Specific activities of ^{210}Pb (total) (а), $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ (excess) (б) in the sedimentary horizons of the core and sedimentation rate (в)

Расчет возраста донного осадка производится по экспоненциальному уравнению, описывающему уменьшение общей удельной активности ^{210}Pb с глубиной только при условии, что поток неравновесного ^{210}Pb на поверхность осадка постоянен и нет процессов, приводящих к его смешиванию или перераспределению (Sanchez-Cabeza, Ruis-Fernandes, 2012). Для полученных в настоящей работе результатов наиболее применима модель расчетов возраста осадочных горизонтов Constant Flux (CF), так как в исследуемой точке Центральной впадины наблюдается постоянный вертикальный поток частиц на дно, слои не подвергаются перемешиванию, следовательно, соблюдаются все условия моделирования по неравновесному ^{210}Pb .

Радиометрический анализ слоев вскрытой осадочной толщи керна показал, что в слое 10–11 см содержание общего ^{210}Pb снизилось до уровня равновесия с исходным радионуклидом ^{226}Ra , что позволило определить нижнюю границу возраста осадочных слоев как 1839 г. Однако модель CF дает высокую погрешность определения даты образования этого слоя (1839 ± 115 лет). Исходя из этого,

за нижнюю границу уверенного определения возраста мы приняли слой 8–9 см, сформированный в 1921 г. (1921 ± 14.3 лет), т. е. возраст нижнего слоя составляет не более 100 лет. Полученные возрасты осадочных слоев керна Центральной котловины хорошо верифицируются по техногенному радионуклиду ^{137}Cs .

Самый нижний слой керна, где обнаружен ^{137}Cs (5–6 см), ориентировочно сформировался в 1950–1960-е гг. В этот период США и Советским Союзом проводились испытания мощных ядерных и термоядерных зарядов в разных районах мира. Так на архипелаге Новая Земля было проведено 75 атмосферных ядерных взрывов, включая взрыв самого мощного термоядерного заряда (“Царь-бомба”). Уже к середине 1950-х гг. уровень концентрации ^{137}Cs в атмосфере Северного полушария повысился достаточно высоко, чтобы создать измеримый сигнал в почвах и донных отложениях водоемов (Техногенные ..., 2005). Таким образом, возраст слоя 5–6 см следует отнести к периоду испытаний ядерного оружия, что сопоставимо с хронологическими данными, полученными по ^{210}Pb . По данным модели CF, осадочный слой исследуемого керна сформировался в период 1956–1970 гг.

В верхних слоях керна (1–5 см) удельная активность ^{137}Cs варьировала в пределах от 1.8 до 4.9 Бк/кг, максимум наблюдался в слое 3–4 см. Такое распределение соответствует по датам трансокеаническому переносу в Баренцево море радиоактивных сбросов завода по переработке ядерного топлива Селлафилд (Великобритания). Пик содержания ^{137}Cs в морской воде Баренцева моря приходится на 1982–1983 гг. (Kautsky, 1988), следовательно, вполне вероятно, что слой керна 3–4 см, где наблюдается резкое увеличение удельной активности радионуклида, сформировался (по модели CF) с 1983 по 1992 гг.

В поверхностном слое керна (0–1 см) удельная активность ^{137}Cs ниже минимально детектируемой активности (< МДА). Этот слой сформировался с 2013 по 2022 гг., в период отсутствия чрезвычайных ситуаций, связанных с выбросами радиоактивных веществ в море и атмосферу.

Скорость седиментации с 1921 по 2022 гг. изменялась от 0.05 до 0.13 см/год, при среднем значении 0.09 см/год (по ^{210}Pb) и 0.1 см/год (по ^{137}Cs). В XX веке темпы седиментации варьировали в пределах 0.07–0.08 см/год. К настоящему времени (2000–2022 гг.) темпы седиментации увеличились в 2 раза, среднее значение составляет 0.14 см/год. Причина изменения скорости осадконакопления – существенное потепление в конце XX–начале XXI века, что соответствует литературным данным (Key ..., 2019).

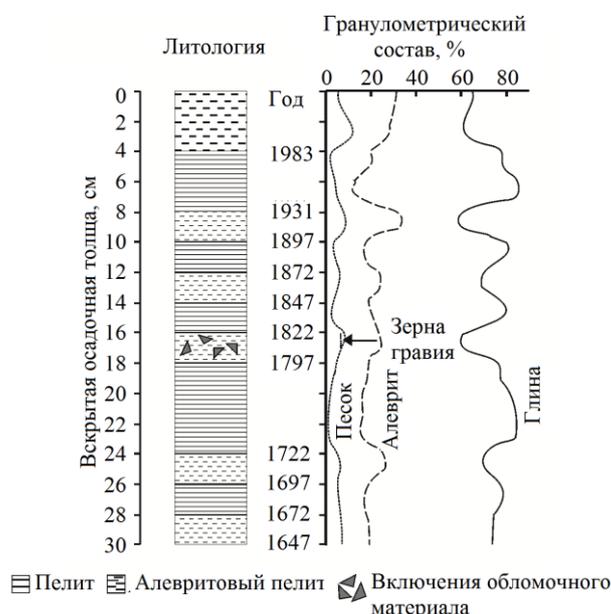


Рис. 3. Хронология формирования типов донных отложений в Центральной впадине Баренцева моря
Fig. 3. Chronology of the formation of bottom sediment types in the Central Depression of the Barents Sea

Таким образом, нами сделана попытка реконструкции возраста осадочной толщи Центральной впадины Баренцева моря на более ранний период. Учитывая то, что скорость осадконакопления в XX веке до потепления была относительно постоянной (рис. 2), значение 0.08 см/год может быть принято для вычисления возраста нижних слоев. Расчеты показали, что слой 30 см может быть датирован возрастом в 375 лет.

Вскрытая осадочная толща (30 см) сложена зернами пелита и алевролита с примесью разномерного песка, а в редких случаях – гравия. По классификации М. В. Кленовой (1937), в профиле керна вся осадочная толща представлена глинистым илом, а по классификации ВНИИОкеангеологии (Андреева, Лапина, 1998), – алевроитовым пелитом и пелитом (рис. 3).

Присутствие гравийно-галечного материала в слое 16–18 см, который сформировался приблизительно в 1797–1822 гг., свидетельствует об усиленном влиянии ледового разноса в этот период времени. Из литературы известно, что этот временной отрезок приурочен к аномально холодным (за последние 1000 лет) годам малого ледникового периода в Северном полушарии (High-resolution ..., 1998; Mann et al., 1999), что могло повлиять на ледовитость Баренцева моря. Таким образом, гравийно-галечная фракция (материал ледового разноса) позволяет сопоставить рассчитанные нами изотопным методом скорости осадконакопления и возраст осадочных слоев (рис. 3).

Выводы

В Центральной впадине Баренцева моря в последнее 375 лет формируются два периодически сменяющих друг друга типа донных отложений – пелит и алевроитовый пелит. Ледовитость оказывает существенное влияние на формирование донных отложений. В аномально холодные периоды в осадочной толще отмечается увеличение доли зерен крупнозернистого песка и гравия (слой 16–18 см), попавших сюда за счет ледового переноса. Темпы седиментации в настоящее время (2000–2022 гг.) увеличились в 2 раза по сравнению с XX веком.

Работа выполнена по теме Российского научного фонда 22-17-00243 “Радиационная океанология и геоэкология прибрежного шельфа Баренцева и Белого морей. Биокосные взаимодействия в системе: донные отложения–вода–макроводоросли–микроорганизмы, их роль в ремедиации морской прибрежной экосистемы при радиационном и химическом загрязнении в условиях Арктики” (№ госрегистрации 122120700104-2).

Список литературы

1. Андреева И. А., Лапина Н. Н. Методика гранулометрического анализа донных осадков Мирового океана и геологическая интерпретация результатов лабораторного изучения вещественного состава осадков / Науч. ред. В. Л. Иванов. СПб.: ВНИИОкеангеология, 1998. 45 с.
2. Кленова М. В. Осадки Баренцева моря // Тр. Всесоюз. науч.-исслед. ин-та морского рыбного хозяйства и океанографии. 1937. Т. IV, № 1. С. 61–70.
3. Кленова М. В. Геология Баренцева моря. М.: Изд-во АН СССР, 1960. 365 с.
4. Лисицын А. П. Новый тип седиментогенеза в Арктике – ледовый морской, новые подходы к исследованию процессов // Геология и геофизика. 2010. Т. 51, № 1. С. 18–60.
5. Матишов Г. Г., Жичкин А. П., Моисеев Д. В. Схема циркуляции вод и положение климатических фронтальных зон в Баренцевом море. Мурманск: Изд. ММБИ РАН, 2010. 1 с.
6. Митяев М. В., Хасанкаев В. Е., Голубев В. А. Желоба Баренцева моря – современные каналы транспортировки или ловушки осадочного вещества? // Арктика и Антарктика. 2007. № 5(39). С. 72–79.
7. Техногенные радионуклиды в морях, омывающих Россию: радиоэкологические последствия удаления радиоактивных отходов в арктические и дальневосточные моря (Белая книга-2000) / Ю. В. Сивинцев, С. М. Вакуловский, А. П. Васильев и др. М.: ИздАТ, 2005. 624 с.
8. Chronology of sedimentation in Colesbukta, Spitsbergen (Svalbard Archipelago): the results of the 2018 expedition / N. I. Meshcheryakov, I. S. Usyagina, V. V. Sharin, V. A. Dauvalter, G. N. Dukhno // IOP Conf. Series: Earth and Environ. Sci. 2021. № 937. DOI: 10.1088/1755-1315/937/4/042081
9. Facies system of the Eastern Barents Sea since the last glaciation to present / I. Murdmaa, E. Ivanova, J.-C. Duplessy, M. Levitan, T. Khusid, M. Bourtman, G. Alekhina, T. Alekseeva, M. Belousov, V. Serova // Marine Geology. 2006. Vol. 230, № 3. P. 275–303.

10. High-resolution palaeoclimatic records for the last millennium: interpretation, integration and comparison with general circulation model control-run temperatures / P. D. Jones, K. R. Briffa, T. P. Barnett, S. F. B. Tett // *The Holocene*. 1998. Vol. 8, № 4. P. 455–471.
11. *Kautsky H.* Determination of distribution processes, transport routes and transport times in the North Sea and the northern Atlantic using artificial radionuclides as tracers // *Radionuclides: a tool for oceanography B* / J. C. Guary, P. Guegueniat, R. J. Pentreath (Eds.). London: Elsevier, 1988. P. 271–280.
12. Key indicators of Arctic climate change: 1971–2017 / J. E. Box, W. T. Colgan, T. R. Christensen et al. // *Environ. Res. Lett.* 2019. Vol. 14, № 4. DOI: 10.1088/1748-9326/aafc1b
13. *Mann M. E., Bradley R. S., Hughes M. K.* Northern hemisphere temperatures during the past millennium: Inferences, uncertainties, and limitations // *Geophys. Res. Lett.* 1999. Vol. 26, № 6. P. 759–762.
14. *Murdmaa I., Ivanova E.* Deglaciation of the late weichselian Barents Sea ice sheet // *Deglaciation processes, causes and consequences*. 2017. P. 141–171.
15. *Sanchez-Cabeza J. A., Ruiz-Fernández A. C.* ²¹⁰Pb sediment radiochronology: An integrated formulation and classification of dating models // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2012. № 82. P. 183–200. DOI: 10.1016/j.gca.2010.12.024
16. *Zaborska A., Pempkowiak J., Papucci C.* Some sediment characteristics and sedimentation rates in an Arctic fjord (Kongsfjorden, Svalbard) // *Archives Environ. Prot.* 2006. № 8. P. 79–96.

References

1. *Andreeva I. A., Lapina N. N.* *Metodika granulometricheskogo analiza donnykh osadkov Mirovogo okeana i geologicheskaya interpretatsiya rezul'tatov laboratornogo izucheniya veshchestvennogo sostava osadkov* [Methods for the granulometric analysis of bottom sediments in the World Ocean and geological interpretation of results of laboratory study of the sediment composition]. Saint-Petersburg, VNIIOkeangeologiya, 1998, 45 p. (In Russ.).
2. *Klenova M.V.* Osadki Barenceva morya [Bottom sediments of the Barents Sea]. *Trudy Vsesoyuznogo nauchno issledovatel'skogo instituta morskogo rybnogo hozyajstva i okeanografii* [Proceedings of the All-Union Scientific Research Institute of Marine Fisheries and Oceanography], 1937, Vol. 51, No. 1, pp. 18–60. (In Russ.).
3. *Klenova M. V.* *Geologiya Barenceva morya* [Geology of the Barents Sea]. Moscow, Publ. of the USSR Academy of Sciences, 1960, 381 p. (In Russ.).
4. *Lisitzin A. P.* Novyj tip sedimentogeneza v Arktike – ledovyj morskoy, novye podhody k issledovaniyu processov [Marine ice-rafting as a new type of sedimentogenesis in the Arctic and novel approaches to studying sedimentary processes]. *Geologiya i geofizika* [Russian Geology and Geophysics], 2010, Vol. 51, No. 1, pp. 18–60. (In Russ.).
5. *Matishov G. G., Zhichkin A. P., Moiseev D. V.* *Skhema cirkulyacii vod i polozhenie klimaticheskikh frontal'nyh zon v Barencevom more* [Scheme of water circulation and position of climatic frontal zones in the Barents Sea]. Murmansk, Publ. MMBI RAS, 2010, 1 p. (In Russ.).
6. *Mityaev M. V., Khasankaev V. B., Golubev V. A.* Zheloba Barenceva morya – sovremennye kanaly transportirovki ili lovushki osadochnogo veshchestva? [Barents Sea trenches – modern canals of transportation or traps of the sedimental material?]. *Arktika i Antarktika* [Arctic and Antarctica], 2007, Vol. 5, No. 39, pp. 72–79. (In Russ.).
7. *Sivintsev Yu. V., Vakulovsky S. M., Vasiliev A. P., Vysotsky V. L., Gubin A. T., Danilyan V. A., Kobzev V. I., Kryshev I. I., Lavkovsky S. A., Mazokin V. A., Nikitin A. I., Petrov O. I., Pologikh B. G., Skorik Yu. I.* *Tekhnogennye radionuklidy v moryah, omyvayushchih Rossiyu: radioekologicheskie posledstviya udaleniya radioaktivnyh othodov v arkticheskie i dal'nevostochnye morya (Belaya kniga-2000)* [Technogenic radionuclides in the seas washing Russia. Radioecological consequences of the disposal of radioactive waste in the Arctic. Ecology of the Arctic and Far Eastern seas (White Book-2000)]. Moscow, IzdAT, 2005, 624 p. (In Russ.).
8. *Meshcheryakov N. I., Usyagina I. S., Sharin V. V., Dauvalter V. A., Dukhno N. G.* Chronology of sedimentation in Colesbukta, Spitsbergen (Svalbard Archipelago): the results of the 2018. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, No. 937. DOI: 10.1088/1755-1315/937/4/042081
9. *Murdmaa I., Ivanova E., Duplessy J.-C., Levitan M., Khusid T., Bourtman M., Alekhina G., Alekseeva T., Belousov M., Serova V.* Facies system of the Eastern Barents Sea since the last glaciation to present. *Marine Geology*, 2006, Vol. 230, No. 3, pp. 275–303.
10. *Jones P. D., Briffa K. R., Barnett T. P., Tett S. F. B.* High-resolution palaeoclimatic records for the last millennium: interpretation, integration and comparison with general circulation model control-run temperatures. *The Holocene*, 1998, Vol. 8, No. 4, pp. 455–471.
11. *Kautsky H.* Determination of distribution processes, transport routes and transport times in the North Sea and the northern Atlantic using artificial radionuclides as tracers. *Radionuclides: a tool for oceanography B*. London, Elsevier, 1988, pp. 271–280.

12. Box J. E., Colgan W. T., Christensen T. R., Schmidt N. M., Lund M., Parmentier F.-J. W., Brown R., Bhatt U. S., Euskirchen E. S., Romanovsky V. E., Walsh J. E., Overland J. E., Wang M., Corell R. W., Meier W. N., Wouters B., Mernild S., Mard J., Pawlak J., Olsen M. S. Key indicators of Arctic climate change: 1971–2017. *Environmental Research Letters*, 2019, Vol. 14, No. 4. DOI: 10.1088/1748-9326/aafc1b
13. Mann M. E., Bradley R. S., Hughes M. K. Northern hemisphere temperatures during the past millennium: Inferences, uncertainties, and limitations. *Geophysical Research Letters*, 1999, Vol. 26, No. 6, pp. 759–762.
14. Murdmaa I., Ivanova E. Deglaciation of the late weichselian Barents Sea ice sheet. *Deglaciation processes, causes and consequences*, 2017, pp. 141–171.
15. Sanchez-Cabeza J. A., Ruiz-Fernández A. C. ^{210}Pb sediment radiochronology: An integrated formulation and classification of dating models. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2012, No. 82, pp. 183–200. DOI: 10.1016/j.gca.2010.12.024
16. Zaborska A., Pempkowiak J., Papucci C. Some sediment characteristics and sedimentation rates in an Arctic fjord (Kongsfjorden, Svalbard). *Archives of Environmental Protection*, 2006, No. 8, pp. 79–96.

Информация об авторе

Ирина Сергеевна Усягина – кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник,
<https://orcid.org/0000-0002-5984-6479>

Никита Игоревич Мещеряков – кандидат географических наук, старший научный сотрудник,
<https://orcid.org/0000-0002-8955-8611>

Наталья Сергеевна Иванова – стажер-исследователь

Information about the author

Irina S. Usyagina – PhD (Geography), Leading Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-5984-6479>

Nikita I. Mescheriakov – PhD (Geography), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-8955-8611>

Natalia S. Ivanova – Trainee Researcher

Статья поступила в редакцию 23.03.2023; одобрена после рецензирования 31.03.2023; принята к публикации 03.04.2023.
The article was submitted 23.03.2023; approved after reviewing 31.03.2023; accepted for publication 03.04.2023.