

ИНВАЗИВНЫЕ ВИДЫ ДИАТОМОВЫХ ВОДОРΟΣЛЕЙ В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ ДОННЫХ ОСАДКОВ НОРВЕЖСКОГО, ГРЕНЛАНДСКОГО И БАРЕНЦЕВА МОРЕЙ И ВОЗМОЖНОСТИ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ В ПАЛЕООКЕАНОЛОГИЧЕСКИХ РЕКОНСТРУКЦИЯХ

Е.А. Агафонова¹, М.Д. Кравчишина²

^{1,2} Институт океанологии имени П.П. Ширишова РАН,
лаборатория физико-геологических исследований имени А.П. Лисицына

¹ Ст. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: agafonova.ea@ocean.ru

² Вед. науч. сотр., канд. геол.-минерал. наук; e-mail: kravchishina@ocean.ru

В работе представлены результаты исследования распределения инвазивных видов диатомовых водорослей в поверхностном слое донных осадков Норвежского, Гренландского и Баренцева морей. С помощью метода RDA выявлены ключевые факторы, влияющие на содержание инвазивных видов диатомей, среди которых определяющим параметром является продолжительность сезонного ледяного покрова и положение краевой ледовой зоны в районе исследования. Установлено географическое распределение инвазивных видов диатомовых водорослей. Северитихоокеанский вид *Neodenticula seminae* обнаружен только в Северной Атлантике, его распространение ограничено 12–15° в. д. Наличие относительно тепловодных видов диатомей *Shionodiscus oestrupii*, *Coscinodiscus radiatus* и *C. asteromphalus* связано с проникновением теплых атлантических течений, а распределение ледово-морских и ледово-неритических видов напрямую зависит от наличия сезонного ледяного покрова в исследуемом районе арктических морей. Выявлено, что высокие содержания ледово-морских (до 30%) и ледово-неритических видов (более 45%) в осадках могут указывать на близость границы морских льдов в недавнем геологическом прошлом, тогда как низкие содержания (около 2 и 15% соответственно) свидетельствуют об инвазии этих видов с течениями или айсбергами. Полученные данные позволяют использовать инвазивные виды диатомовых водорослей как палеомаркеры палеоокеанологических изменений, включая интенсивность поступления теплых атлантических вод в Северный Ледовитый океан, границы распространения сезонного морского льда и краевой ледовой зоны.

Ключевые слова: Норвежско-Гренландский бассейн, методика палеорекопструкций, диатомовые водоросли

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.80.6.10

ВВЕДЕНИЕ

Беспрецедентные скорости современного изменения климата в Арктике обусловлены увеличением теплообмена с Северной Атлантикой, ростом температуры воздуха и поверхности воды в океане, а также сокращением морского ледяного покрова [Johannessen et al., 2019; Stroeve et al., 2007]. В связи с этим особую значимость приобретает анализ прошлых и текущих изменений в морских экосистемах арктического и субарктического регионов и реконструкция этих вариаций с целью установления причин и количественной оценки естественной трансформации окружающей среды, а также разработки прогностических моделей природно-климатических преобразований, происходящих в результате антропогенного влияния. Диатомовые водоросли как компонент фитопланктонного сообщества проявляют максимальную чувствительность к изменениям окружающей среды. Эта особенность позволяет использовать их в качестве биоиндикаторов

для анализа изменения современных параметров экосистем и реконструкции палеообстановок прошлых геологических эпох [Диатомовые водоросли СССР..., 1974]. Основополагающий принцип палеорекопструкций заключается в том, что формирование диатомовых танатоценозов поверхностного слоя донных осадков морей и океанов строго зависит от состава биоценозов водных масс, а видовой состав танатоценозов в целом отражает гидрологические и седиментационные обстановки над соответствующими участками дна [Полякова, 1997]. При этом последние исследования [Miettinen et al., 2013; Oksman et al., 2019; Паутова, 2021] все чаще фиксируют наличие в биоценозах и танатоценозах относительно тепловодных видов диатомовых водорослей в центральных и северных районах Баренцева моря, а также ледово-морских и ледово-неритических видов в акваториях, свободных от сезонного ледяного покрова в Норвежско-Гренландском бассейне. Более того, субполярная Се-

верная Атлантика стала местом обнаружения североатлантических видов, для которых она является районом выселения [Miettinen et al., 2013]. В связи с этим возникла необходимость определить границы распространения инвазивных видов в поверхностном слое донных осадков, что позволит оценить возможности использования этих видов в качестве индикаторных при проведении палеоокеанологических реконструкций.

Пограничная область между Норвежско-Гренландским бассейном и Баренцевым морем является ключевой для изучения влияния атлантических вод на биоразнообразие и состояние экосистем Арктики. Через эту пограничную область поступает более половины теплой и соленой воды из Атлантического в Северный Ледовитый океан, а Баренцево море служит своеобразными «воротами» для поступления североатлантических вод на шельф и континентальный склон Евразии [Loeng, 1991; Polyakov et al., 2017; Писарев, 2021], что существенно влияет на климатическую систему всей Арктики, формирование донных осадков и танатоценозов в осадочной толще.

Состав диатомовых водорослей поверхностных осадков Северной Атлантики исследуется уже не первое десятилетие [Koç, Schrader, 1990; Andersen et al., 2004; Oksman et al., 2019]. Накоплен обширный массив информации, создан набор калибровочных данных, включающий в себя информацию о диатомовых водорослях 184 образцов поверхностных отложений [Koç, Schrader, 1990; Miettinen et al., 2015]. При палеоокеанологических реконструкциях Северной Атлантики сложился традиционный подход, заключающийся в выделении групп диатомовых водорослей, соответствующих типам водных масс: арктико-гренландской, североатлантической, субарктической, Норвежского течения и др. [Andersen et al., 2004; Oksman et al., 2019]. Однако все виды, относимые к этим группам, выделяются как инклюзивные, и, несмотря на то что вариации их соотношения в танатоценозах дают прямую информацию о векторе изменения природных условий, необходимо выделение конкретных индикаторных видов, с помощью которых мы могли бы судить не только о направленности природного процесса, но и о причине изменения. Выявлено [Oksman et al., 2019], что не все виды, обнаруженные в поверхностном слое донных осадков ряда районов Северной Атлантики, ранее соотносимые с конкретными типами водных масс, имеют статистически значимую связь с этими водными массами. В первую очередь такое явление наблюдается для ледово-морских и ледово-неритических видов диатомовых водорослей [Oksman et al., 2019].

Диатомовые комплексы морей западного сектора Российской Арктики исследованы в несколько

меньшей степени, чем Северной Атлантики. Тем не менее в результате многолетних работ [Полякова, 1997] получены данные о составе диатомовых ассоциаций более чем 70 образцов поверхностных осадков Баренцева моря. Получены и обобщены результаты исследований состава диатомовых водорослей в планктоне и бентосе Баренцева моря [Роухияйнен, 1966; Диатомовые водоросли СССР, 1974; Rat'kova, Wassmann, 2002; Ardyna et al., 2014; Паутова, 2021]. При этом состав диатомовых ассоциаций поверхностных осадков Баренцева моря, в отличие от состава фитопланктона, крайне беден в связи с перераспределением тонкозернистых частиц по элементам рельефа дна и растворением отдельных створок [Полякова и др., 2021].

В работе представлены результаты исследования состава инвазивных видов диатомовых водорослей в поверхностном слое донных осадков Норвежско-Гренландского бассейна и Баренцева моря. Установлены возможности их использования для реконструкции конкретных палеоокеанологических событий и их причин.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Район исследования включал в себя Норвежское море, рифтовые зоны хребтов Мона и Книповича, юго-восточную часть Гренландского моря, западную, северную и северо-восточную части Баренцева моря, включая акватории вблизи архипелага Земля Франца-Иосифа и южной части желоба Франц-Виктория (рис. 1). Отбор проб осуществлялся в 67-м [Система Баренцева моря..., 2021], 68-м [Кравчишина и др., 2019] и 75-м [Клювиткин и др., 2020] рейсах НИС «Академик Мстислав Келдыш» в 2016, 2017 и 2019 гг. соответственно с помощью мультикорера KUM MiniMUC, который позволяет отбирать ненарушенный верхний слой донных осадков с высокой дискретностью. Для диатомового анализа отбирались верхние 2 см. Поверхностные осадки не были датированы в данной работе. Однако на основе корреляции с соседними колонками донных осадков, имеющими возрастную привязку [Andersen et al., 2004; Riesebrøbakken et al., 2010; Иванова, Мурдмаа, 2021; Matul et al., 2024], предполагается, что изученные осадки имеют современный возраст, не превышающий первые десятки лет.

Подготовка образцов для диатомового анализа проводилась по стандартной методике [Диатомовые водоросли СССР..., 1974] и заключалась в термической обработке осадка в 10%-м растворе перекиси водорода (H_2O_2) и последующей декантации дистиллированной водой до полного отмучивания от перекиси и глинистых частиц. Видовые определения диатомей в препаратах осуществлялись с помощью микроскопа Olympus CX43 при увеличении в 1000

раз с использованием иммерсии Immersol 518 N (Carl Zeiss Microscopy GmbH) с показателем преломления 1,518. Количественная оценка состава диатомовых ассоциаций осуществлялась по методу Баттарби [Battarbee, 1973]. Для этого в составе диатомовых ассоциаций подсчитывалось 300–400 створок. Признаков существенного растворения створок диатомовых водорослей, связанного с изменением глубины при их осаждении в толще воды, в исследованных образцах не наблюдалось.

Поскольку возраст исследованных поверхностных осадков оценивается в пределах первых десятилетий, то для статистического анализа были использованы средние значения солёности и температур поверхностных вод за несколько лет. Зна-

чения среднемноголетней температуры (SST) и солёности (SSS) поверхностных вод заимствованы из World Ocean Atlas [Garcia et al., 2018]. Проведено сравнение границ распространения видов диатомовых водорослей со среднемноголетней площадью сезонного ледяного покрова (SIC) и миграцией краевой ледовой области с концентрациями льда от 15 до 80% (MIZ80) и от 0 до 15% (MIZ15) по [Aksenov et al., 2017; Strong, Rigor, 2013], которые определялись с использованием следующих источников: U.S. National Ice Center [2020], ЕСИМО ААНИИ [2025], Norsk Polarinstitutt [2025]. Все данные о температуре, солёности и границах сезонного морского льда, использованные в данном исследовании, находятся в свободном доступе.

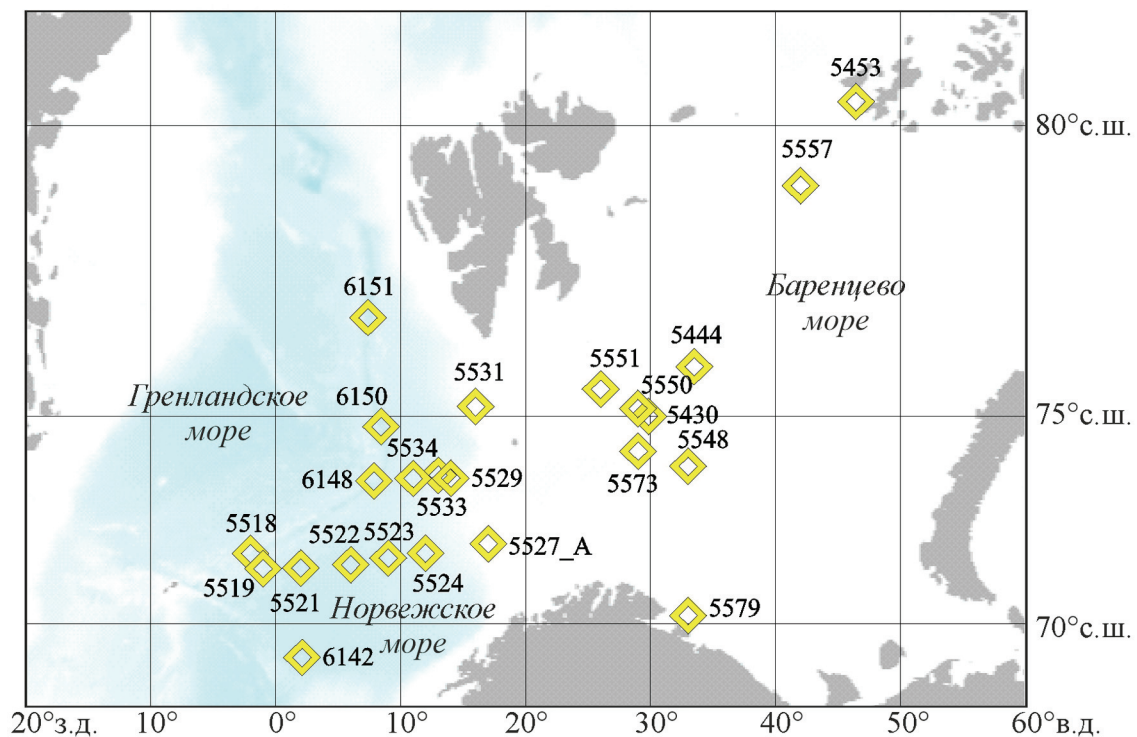


Рис. 1. Схема расположения станций, на которых происходил отбор образцов поверхностного слоя донных осадков (0–1 и 1–2 см)

Fig. 1. Location of stations where the surface layer of bottom sediments was sampled (0–1 and 1–2 cm)

Методы многомерного анализа, а именно ординации, были применены для определения закономерностей отношений между несколькими переменными: ранее упомянутыми условиями морских экосистем и содержаниями выделенных инвазивных видов диатомовых водорослей. Анализ соответствия с детрендриванием (DCA) применялся для определения длин экологических градиентов при анализе обилия видов в различных местообитаниях [ter Braak, Smilauer, 1998]. Для нашего набора

данных этот анализ показал, что содержания инвазивных видов диатомовых водорослей в поверхностном слое донных осадков, демонстрируют линейную зависимость с основными абиотическими факторами среды обитания (значениями среднемноголетней температуры (SST) и солёности (SSS) поверхностных вод, среднемноголетнего количества месяцев, когда станция была перекрыта сезонным морским льдом (SIC), находилась в краевой ледовой зоне (MIZ80) или в непосредственной близости

от нее (MIZ15)): градиентная длина первой оси составила 2.8 *sd*. Применение DCA показало, что методы прямой ординации являются предпочтительными для нашего набора данных, и был применен анализ избыточности (RDA) [ter Braak, Smilauer, 1998] для установления наиболее значимых факторов окружающей среды для объяснения различий в составе сообществ диатомовых водорослей. DCA и RDA выполнены с помощью программного обеспечения CANOCO [ter Braak, Smilauer, 1998].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В составе ассоциаций диатомовых водорослей в исследованных 46 пробах поверхностного слоя донных осадков было обнаружено 93 вида. Среди них в Норвежском и Гренландском морях были выделены следующие инвазивные виды: североатлантический планктонный вид *Neodenticula seminae*, относительно тепловодный *Shionodiscus oestrupii*, ледово-морские виды *Fragilariopsis cylindrus* и *F. oceanica*, ледово-неритические виды *Bacterosira bathyomphala*, *Chaetoceros furcellatus*, *Porosira glacialis*, *Thalassiosira antarctica*, *Th. nordenskioeldii*. В составе диатомовых водорослей поверхностного слоя донных осадков Баренцева моря были выделены относительно тепловодные инвазивные

виды: *Shionodiscus oestrupii*, *Coscinodiscus radiatus* и *C. asteromphalus*. Важно отметить, что виды *C. radiatus* и *C. asteromphalus* в отличие от *S. oestrupii* не являются инвазивными для Норвежского и Гренландского морей, но однозначно являются таковыми для Баренцева моря. И наоборот, ледово-морские и ледово-неритические виды не являются инвазивными для Баренцева моря в отличие от практически всей акватории Норвежско-Гренландского бассейна. Распространение этих видов прослежено как в нативных районах, так и за их пределами.

Результаты многомерного анализа. По данным RDA было определено, что значения SST, SSS, SIC, MIZ80 и MIZ15 объясняют 73,57% ($\lambda_1 = 0,7131$ и $\lambda_2 = 0,0167$) вариаций содержаний инвазивных видов диатомовых водорослей в поверхностном слое донных осадков (рис. 2). При этом показано, что среднемноголетняя продолжительность перекрытия станции сезонным морским льдом (SIC), количество месяцев, когда станция находилась в краевой ледовой зоне (MIZ80, концентрация льда от 15 до 80%) или в непосредственной близости от краевой ледовой зоны (MIZ15, концентрация льда от 0 до 15%) определяют минимальный набор факторов, наиболее достоверно объясняющих изменчивость содержания инвазивных видов диатомовых водорослей в поверхностном слое донных осадков ($p \leq 0,05$).

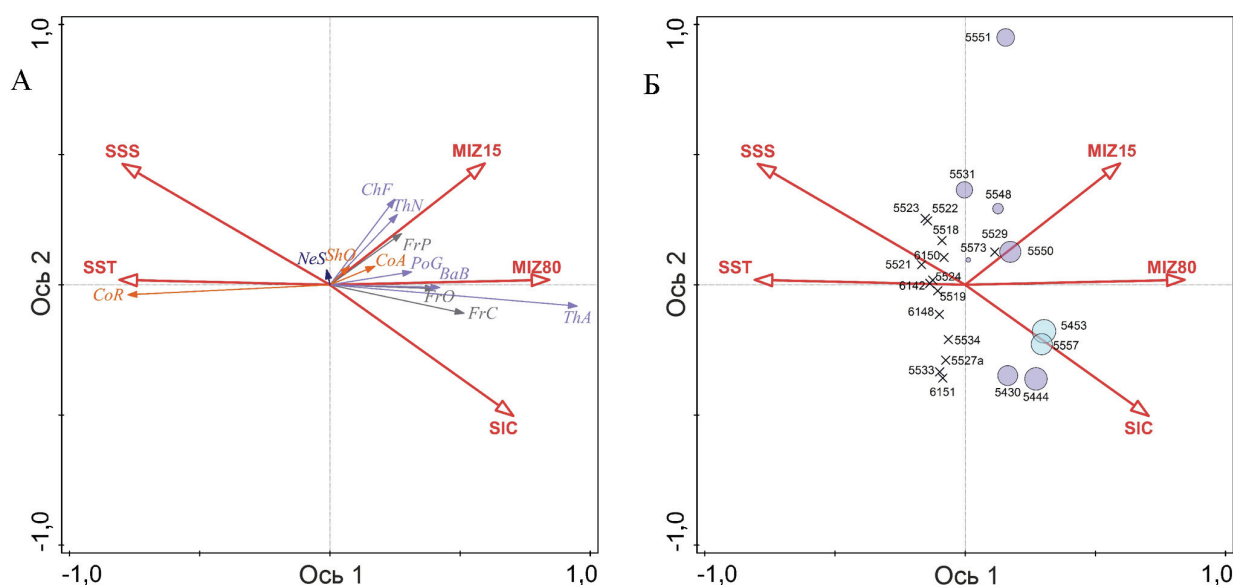


Рис. 2. RDA-диаграммы, иллюстрирующие взаимосвязь между наиболее значимыми экологическими факторами и содержаниями отдельных инвазивных видов диатомовых водорослей (А) и сообществ инвазивных видов диатомовых водорослей на отдельных станциях (Б). Цветом обозначены: серым – ледово-морские виды; фиолетовым – ледово-неритические виды; синим – *N. seminae*; оранжевым – относительно тепловодные виды; голубыми кругами – станции, перекрываемые морским сезонным ледяным покровом; фиолетовыми кругами – станции, находящиеся в зонах MIZ80 и MIZ15

Fig. 2. RDA diagrams illustrating the correlation between the most significant environmental factors and the abundances of individual invasive diatom species (A) and invasive diatom assemblages at individual stations (B). Sea-ice species are indicated in gray, ice-neritic ones in purple, *N. seminae* in blue, and relatively warm-water species in orange. Stations covered by the seasonal sea ice are marked in light blue circles, and stations located in MIZ80 and MIZ15 zones are indicated by purple circles

RDA показал, что ось 1 положительно коррелирует ($r = 0,5471$; $0,7749$ и $0,6479$) с наиболее значимыми параметрами – SIC, MIZ80, MIZ15, и отрицательно – со значениями SSS и SST ($r = -0,7323$ и $-0,7429$), а ось 2 показывает положительную корреляцию с MIZ80 и MIZ15 ($r = 0,2288$ и $0,0094$), а также SSS и SST ($r = 0,2279$ и $0,0093$). С осью 2 негативно коррелировали значения SIC ($r = -0,2472$). Установлено, что наиболее значимым параметром, оказывающим влияние на изменение содержания инвазивных видов диатомовых водорослей в поверхностном слое донных осадков, была продолжительность нахождения в районе исследований краевой ледовой зоны MIZ80 (50,8% вариаций).

Распределение северотихоокеанского вида *Neodenticula seminae*. Северотихоокеанский планктонный вид *N. seminae* был обнаружен в поверхностном слое донных осадков, отобранных на девяти станциях (5518, 5519, 5521, 5522, 5523, 5524, 6142, 6148, 6150) в восточной части Северной Атлантики, где его содержание изменялось от 0,8 до 9,9%, а концентрации – от 2,1 до 4,3 тыс. ств./г. В поверхностном слое донных осадков Баренцева моря *N. seminae* представлен не был. Наиболее восточные находки этого вида ограничиваются 12° в. д. согласно нашим данным и 15° в. д. согласно [Miettinen et al., 2013] и не выходят за пределы влияния Шпицбергенской ветви Норвежского течения (рис. 3). Ранее на основе исследования состава ассоциаций диатомовых водорослей осадочного вещества Лофотенской котловины было установлено, что *N. seminae* поступает в Норвежское море из более южных районов субполярной Северной Атлантики [Агафонова и др., 2025], куда, в свою очередь, проникает вместе с промежуточными водами [Buckley, Marshall, 2016] из моря Лабрадор, в которое он мигрирует из Тихого океана через Канадский Арктический архипелаг в летний сезон [Reid et al., 2007]. Ординация *N. seminae* по отрицательной стороне с осью 1 (3,5%, рис. 2А), имеющей отрицательную корреляцию с SSS и SST, подтверждает инвазию этого вида под воздействием переноса водных масс в северо-восточном направлении из более южных районов субполярной Северной Атлантики.

Распределение относительно тепловодных видов диатомовых водорослей. В составе относительно тепловодных инвазивных видов диатомовых водорослей в поверхностном слое донных осадков были обнаружены *Shionodiscus oestrupii*, *Coscinodiscus radiatus* и *C. asteromphalus*. Их суммарное содержание изменяется от 1 до 50%, концентрации – от 0,5 до 336,4 тыс. ств./г, а распространение тесно связано с проникновением теплых течений из южной части Атлантического океана в северную и затем в Баренцево море (рис. 3).

Среди относительно тепловодных видов диатомовых водорослей повсеместно доминировал *C. radiatus*, имеющий отрицательную ординацию с осью 1 (85,3%, рис. 2А). Наибольшая его численность (60,82%) зафиксирована в рифтовой зоне южного сегмента хребта Мона на ст. 5521.

S. oestrupii – распространенный в Северной Атлантике вид, однако, самая высокая его численность (до 40%) обнаружена в пределах $40-60^\circ$ с. ш. [Oksman et al., 2019]. Ранее регистрировалась инвазия *S. oestrupii* в центральную и северную части Норвежского и Гренландского морей во время климатического оптимума голоцена (9,5–6,5 тыс. кал. н. л.), когда реконструированная температура поверхностных вод была выше современной на 4°C [Andersen et al., 2004]. В наших пробах его содержание в поверхностном слое донных осадков не превышало 5,7% (ст. 5524). Наиболее восточной его находкой стали донные осадки ст. 5548 (2,46%) в юго-западной части Баренцева моря в районе Демидовской банки.

В поверхностном слое донных осадков четырех станций в Баренцевом море относительно тепловодные виды диатомовых водорослей не были представлены. Две из этих станций (ст. 5453 и 5557) находились в районе архипелага Земля Франца-Иосифа и южной части желоба Франц-Виктория, куда доходят существенно трансформированные атлантические воды [Lind, Ingvaldsen, 2012; Писарев, 2021]. Помимо этого, отсутствие относительно тепловодных видов в донных осадках этих районов обусловлено продолжительным перекрытием сезонным морским льдом (до 12 месяцев в году, см. рис. 2Б) и, как следствие, длительным периодом слабой освещенности фотического слоя вод – один из лимитирующих факторов вегетации диатомовых водорослей [Диатомовые водоросли СССР, 1974]. Поэтому в составе ассоциаций диатомовых водорослей донных осадков ст. 5453 доминируют исключительно ледово-неритические виды, а ст. 5557 – ледово-морские и ледово-неритические виды, способные обитать в условиях низкой инсоляции. Цветение этих видов диатомовых приурочено к началу деградации сезонного морского ледяного покрова [Poulin, 1990; Horner, 1989; Полякова, 1997; Polyakova, 2003; von Quillfeldt, 1997], а поступление в осадочное вещество на глубины более 300 м происходит с задержкой в 1-2 недели [Agafonova et al., 2023].

Распределение ледово-морских видов диатомовых водорослей. Группа ледово-морских видов диатомовых водорослей в исследованных пробах донных осадков представлена: *Fragilariopsis cylindrus*, *F. oceanica* и *F. pseudonana*. Суммарные концентрации этих видов изменяются от 0,2 до 10,9 тыс. ств./г. Ледово-морские виды ординированы с положи-

тельной стороны с осью 1 (в среднем 49,9%, см. рис. 2А). С осью 2, имеющей отрицательную корреляцию со значениями SIC, отрицательно ординированы *F. cylindrus* и *F. oceanica* (в среднем 46,6%, см. рис. 2А), в то время как вид *F. pseudonana* ординирован с осью 2 по положительной стороне (55,3%, рис. 2А). Последнее связано с тем, что этот вид был обнаружен исключительно в донных осадках ст. 5551, в районе которой располагалась MIZ80 и MIZ15 на протяжении практически всего года. Максимальные содержания (до 30,3%) ледово-морских видов зафиксированы на ст. 5557, расположенной в южной части желоба Франц-Виктория и согласно среднесезонным данным перекрываемой до 6 месяцев в году сезонным морским льдом и до 6 месяцев находящейся в краевой ледовой зоне MIZ80 (см. рис. 2Б). Низкие содержания ледово-морских

видов, не превышающие 2%, обнаружены в поверхностном слое донных осадков у архипелага Земля Франца-Иосифа (ст. 5453). Причиной этого является слабая освещенность фотического слоя, связанная с наличием сезонного ледяного покрова разной степени сплоченности: 80–100% – 8 месяцев и 15–80% – 4 месяца в году, в том числе в момент весеннего цветения фитопланктона, который в северной части Баренцева моря приходится на июнь – июль.

Интересным представляется наличие локального пика (24,6%) ледово-морских видов в поверхностном слое донных осадков ст. 5548 в юго-западной части Баренцева моря в районе Демидовской банки. Вблизи этой акватории с января по март расположена краевая ледовая зона MIZ15, и обнаруженные высокие содержания ледово-морских видов связаны с весенним цветением во время таяния сезонного морского льда.

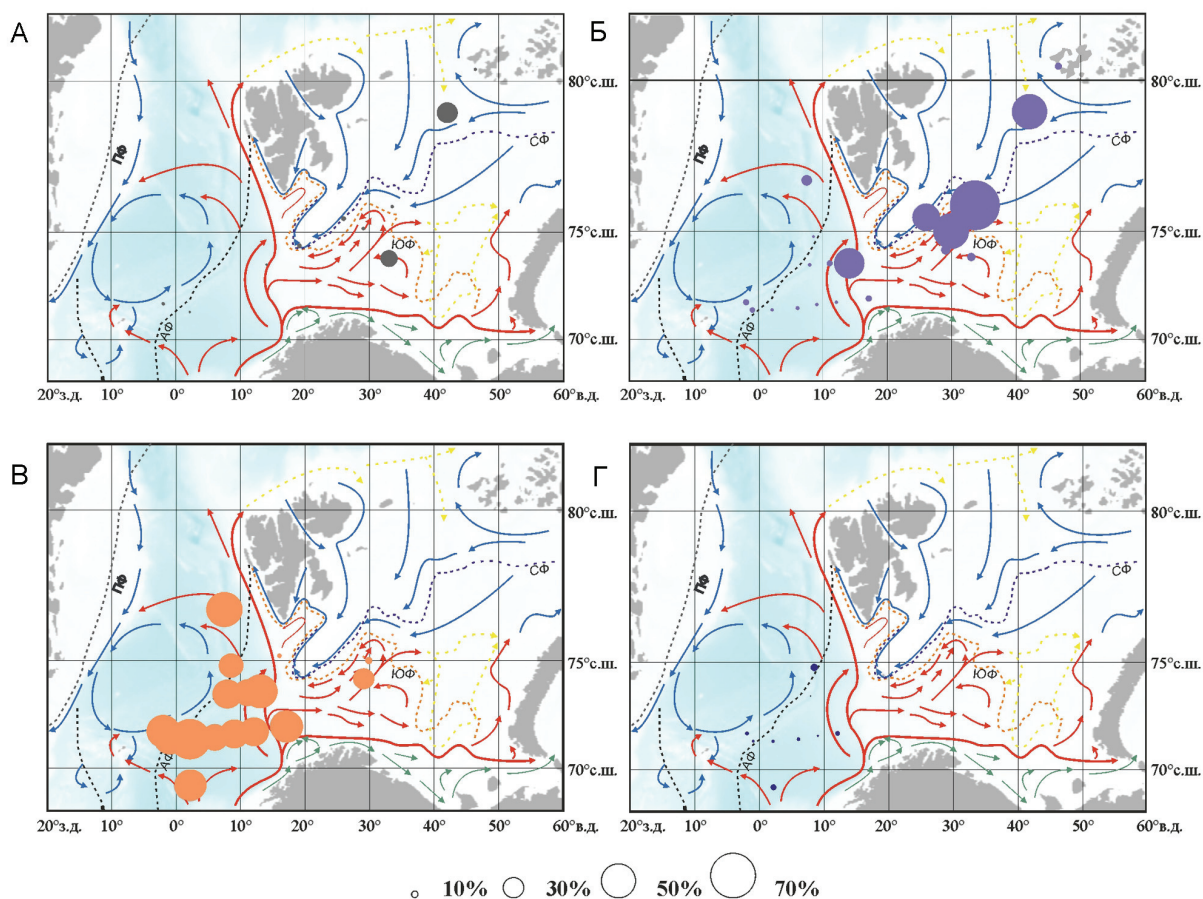


Рис. 3. Распределение содержания инвазивных видов диатомовых водорослей в поверхностном слое донных осадков: А – ледово-морских; Б – ледово-неритических; В – относительно тепловодных; Г – северотихоокеанского *N. seminae*. Цветными стрелками обозначены: красными – теплые течения, синими – холодные течения, зелеными – прибрежные течения, желтыми пунктирными – подповерхностные течения. Пунктирными линиями обозначены положения фронтов: ПФ – полярного, АФ – арктического, ЮФ – южного, выделяемого по температурному градиенту, СФ – северного, выделяемого по соленостному градиенту по [Loeng, 1991; Buckley, Marshall, 2016; Писарев, 2021]

Fig. 3 Invasive diatom species' distribution in the surface layer of bottom sediments: А – sea-ice, Б – ice-neritic; В – relatively warm-water; Г – North Pacific *N. seminae*. Red arrows indicate warm currents, blue arrows indicate cold currents, green arrows indicate coastal currents, yellow dashed arrows indicate subsurface currents, and dashed lines indicate the positions of the atmospheric fronts:

ПФ – Polar; АФ – Arctic; ЮФ – Southern (distinguished by the temperature gradient); СФ – Northern (distinguished by the salinity gradient), according to [Loeng, 1991; Buckley and Marshall, 2016; Pisarev, 2021]

В небольших количествах (0,5–3,8%) ледово-морские диатомовые водоросли обнаружены в Норвежско-Гренландском бассейне в области влияния Восточно-Гренландского течения вблизи арктического фронта. Одной из причин появления ледово-морских видов диатомовых водорослей в поверхностном слое осадков континентального склона в конусе выноса Медвежинского желоба (ст. 5529, 1,5%) может быть дрейф айсбергов. Изученная область близко расположена к зоне наиболее вероятного айсбергового воздействия [Keghouche et al., 2010; Мазнев и др., 2023]. Нельзя исключать и другую причину, связанную с переотложением ледово-морских видов из айсберговых осадков позднего ледового возраста [Bjarnadóttir et al., 2014; Мазнев и др., 2023]. Это явление подтверждается данными о преобладании характерных для атлантических вод диатомей и отсутствии ледово-морских видов в составе фитопланктона в зоне конвергенции теплых североатлантических течений у западного края баренцевоморского шельфа [Паутова, 2021].

Распределение ледово-неритических видов диатомовых водорослей. Ледово-неритические виды, обнаруженные в разном количестве (от 0,4 до 225,1 тыс. ств./г) практически во всех исследованных образцах донных осадков, представлены створками *Bacterosira bathyomphala*, *Chaetoceros furcellatus*, *Porosira glacialis*, *Thalassiosira antarctica* и *Th. nordenskioeldii*. Наибольшие содержания (75,9–53,5%) этих видов зафиксированы вблизи архипелага Земля Франца-Иосифа и в центральной части Баренцева моря. При этом количество ледово-неритических видов в донных осадках Норвежско-Гренландского бассейна было практически на порядок величины меньше таковых в Баренцевом море, за исключением станций 5529 и 6151, где их доля достигала 46,4 и 15,7%. В первом случае (ст. 5529) причины наличия ледово-неритических видов в большом количестве, скорее всего, аналогичны описанным выше факторам появления ледово-морских видов в осадках этой станции. Во втором случае, несмотря на то что ст. 6151 не перекрывается в течение года сезонным морским ледяным покровом, на протяжении пяти месяцев в году в этом районе расположена краевая ледовая зона MIZ15, в том числе в период весеннего цветения фитопланктона. В целом распространение ледово-неритических видов в осадках соответствует положению краевой ледовой зоны, что также видно по положительной ординации всех обнаруженных ледово-неритических видов с осью 1 (в среднем 50,62%, см. рис. 2А), которая положительно коррелирует с SIC, MIZ80 и MIZ15. Наличие ледово-неритических видов в небольшом количестве в осадках северной части Норвежского моря и юго-восточной части

Гренландского моря, вероятно, связано с их проникновением вместе с дрейфом льда из Центрального Арктического бассейна через пролив Фрама в субполярную Северную Атлантику и дальнейшем переносом створок поверхностными течениями.

Для донных осадков ряда станций (5430, 5444, 5548, 5550 и 5573) в Баренцевом море отмечено одновременное появление в больших количествах относительно тепловодных видов вместе с ледово-морскими и ледово-неритическими, что связано со значительным влиянием теплых атлантических вод в этих районах [Loeng, 1991; Polyakov et al., 2017; Писарев, 2021]. Усиление влияния атлантических вод способствует сокращению морского сезонного ледяного покрова и, как следствие, расширению краевой ледовой зоны в Баренцевом море, что ранее было установлено исследованиями состава фитопланктона [Pautova et al., 2024].

ВЫВОДЫ

С помощью метода RDA установлены преобладающие факторы, наиболее достоверно объясняющие изменчивость содержания инвазивных видов диатомовых водорослей в поверхностном слое донных осадков, а именно: 1) среднемноголетняя продолжительность перекрытия акватории сезонным морским льдом (SIC); 2) продолжительность нахождения краевой ледовой зоны MIZ80 (концентрация льда от 15 до 80%) в районе исследования или непосредственная близость краевой ледовой зоны MIZ15 (концентрация льда от 0 до 15%) к району исследования. Наиболее значимым параметром, оказывающим влияние на изменение содержания инвазивных видов диатомовых водорослей в поверхностном слое донных осадков, была продолжительность нахождения станции в краевой ледовой зоне MIZ80.

Северотихоокеанский планктонный вид *N. seminae* обнаружен только в осадках восточной части субполярной Северной Атлантики. Наиболее восточные находки этого вида в поверхностных осадках ограничиваются 12–15° в. д. и не выходят за пределы влияния Шпицбергенской ветви Норвежского течения. Следовательно, обнаружение этого вида в колонках осадков при палеореконструкциях условий среды обитания в Северной Атлантике может интерпретироваться как результат переноса водных масс в северо-восточном направлении из более южных частей субполярной Северной Атлантики.

Выявлено, что распространение тепловодных инвазивных видов диатомовых водорослей, таких как *Shionodiscus oestrupii*, *Coscinodiscus radiatus* и *C. asteromphalus*, в Северной Атлантике и Баренцевом море строго связано с проникновением теплых течений из южной части Атлантического океана. Вследствие этого одновременное появление инва-

живных, относительно тепловодных видов наряду с ледово-морскими и ледово-неритическими в колонках осадков в больших количествах является палеомаркером усиления поступления теплых атлантических вод в субполярную Северную Атлантику и Баренцево море, деградации морского сезонного ледяного покрова и расширения краевой ледовой зоны.

Наибольшие содержания ледово-морских и ледово-неритических видов диатомовых водорослей приурочены к областям, находящимся либо в краевой ледовой зоне, либо в непосредственной ее близости. В районах, перекрываемых морским сезонным ледяным покровом до восьми месяцев в году, содержание ледово-морских видов диатомовых водорослей в поверхностных осадках было низким. Вне пределов областей распространения сезонного морского ледяного покрова ледово-морские и ледово-неритические виды обнаружены в небольшом количестве в Норвежско-Гренландском бассейне. Их распространение ограничено влиянием Восточно-Гренландского течения и связано с выносом льда

через пролив Фрама из Центрального Арктического бассейна. Обнаружение в осадках конуса выноса Медвежинского желоба ледово-морских и ледово-неритических видов диатомовых водорослей связано с дрейфом айсбергов, либо переотложением айсберговых осадков позднеголоценового возраста.

Таким образом, наличие ледово-морских и ледово-неритических видов в донных осадках не может трактоваться прямолинейно. Высокие содержания ледово-морских (порядка 30%) и ледово-неритических видов (более 45%) в донных осадках будут указывать на близость границы сезонного ледяного покрова в недавнем геологическом прошлом. Низкие содержания этих видов (около 2% в случае ледово-морских видов и 15% – ледово-неритических) могут свидетельствовать об инвазии течениями, вследствие дрейфа айсбергов, а также о неблагоприятных условиях для развития ледово-морских микроводорослей, связанных со слабой освещенностью под сезонным морским покровом в течение большей части года.

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-77-00025 (<https://rscf.ru/project/24-77-00025/>) при дополнительной поддержке в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИО РАН (тема № FMWE-2024-0020, экспедиционные исследования и отбор проб). Экспедиционные работы выполнены с использованием оборудования уникальной научной установки НИС «Академик Мстислав Келдыш» в составе ЦКП «Научный флот ИО РАН» (<https://rv.ocean.ru/flot/abf/nis-akademik-mstislav-keldyish>). Авторы благодарны экипажу НИС «Академик Мстислав Келдыш», всем участникам экспедиций и отдельно благодарят Н.В. Козину за помощь в отборе проб осадков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Агафонова Е.А., Кловиткин А.А., Новигатский А.Н. и др. Инвазивные виды диатомовых водорослей в осадочном веществе Лофотенской котловины (Норвежское море) // ДАН. Науки о Земле. 2025. Т. 524. № 1. С. 114–123.
- Диатомовые водоросли СССР (ископаемые и современные). Т. 1. / под ред. А.И. Прошкиной-Лавренко. Л.: Наука, 1974. 403 с.
- Иванова Е.В., Мурдмаа И.О. Последлениковская палеоокеанология Баренцева моря // Система Баренцева моря / под ред. академика А.П. Лисицына. М.: ГЕОС, 2021. С. 109–126. DOI: 10.29006/978-5-6045110-0-8/(10).
- Кловиткин А.А., Кравчишина М.Д., Немировская И.А. и др. Исследование седиментосистем Европейской Арктики в 75-м рейсе научно-исследовательского судна «Академик Мстислав Келдыш» // Океанология. 2020. Т. 60(3). С. 485–487. DOI: 10.31857/S003015742003003X.
- Кравчишина М.Д., Новигатский А.Н., Саввичев А.С. и др. Исследование седиментосистем Баренцева моря и Норвежско-Гренландского бассейна в 68-м рейсе научно-исследовательского судна «Академик Мстислав Келдыш» // Океанология. 2019. Т. 59. № 1. С. 173–176.
- Мазнев С.В., Кокин О.В., Архипов В.В. и др. Современные и реликтовые следы айсберговой экзарации дна Баренцева и Карского морей // Океанология. 2023. Т. 63. № 1. С. 95–107.
- Паутова Л.А. Фитопланктон Баренцева моря // Система Баренцева моря / под ред. академика А.П. Лисицына. М.: ГЕОС, 2021. С. 317–330. DOI: 10.29006/978-5-6045110-0-8/(25).
- Писарев С.В. Обзор гидрологических условий Баренцева моря // Система Баренцева моря / под ред. академика А.П. Лисицына. М.: ГЕОС, 2021. С. 153–166. DOI: 10.29006/978-5-6045110-0-8/(13).
- Полякова Е.И., Новичкова Е.А., Агафонова Е.А. Диатомеи и водные палиноморфы в донных осадках Баренцева моря: основные закономерности распространения и использование в палеоокеанологических исследованиях // Система Баренцева моря / под ред. А.П. Лисицына. М.: ГЕОС, 2021. С. 64–95.
- Полякова Е.И. Арктические моря Евразии в позднем кайнозое. М.: Научный мир, 1997. 145 с.
- Роухияйнен М.И. Качественный состав фитопланктона Баренцева моря // Состав и распределение планктона и бентоса южной части Баренцева моря. М.; Л.: Наука, 1966. С. 3–23.
- Система Баренцева моря / под ред. академика А.П. Лисицына. М.: ГЕОС, 2021. 672 с.
- Agafonova E., Novichkova E., Novigatsky A. et al. Diatom and dinocyst production, composition and flux from the annual cycle sediment trap study in the Barents Sea, *Geosciences*, 2023, no. 13(1), DOI: 10.3390/geosciences13010001.

- Aksenov Y., Popova E. E., Yool A. et al. On the future navigability of Arctic Sea routes: High-resolution projections of the Arctic Ocean and sea ice, *Mar. Pol.*, 2017, vol. 75, p. 300–317, DOI: 10.1016/j.marpol.2015.12.027.
- Andersen C., Koç N., Jennings A. et al. Nonuniform response of the major surface currents in the Nordic Seas to insolation forcing: Implications for the Holocene climate variability, *Paleoceanography*, 2004, no. 19, PA2003, DOI: 10.1029/2002PA000873.
- Ardyna M., Babin M., Gosselin M. et al. Fall Phytoplankton Blooms, *Geophys. Res. Lett.*, 2014, vol. 41, p. 6207–6212.
- Battarbee R.W. A new method for the estimation of absolute microfossil numbers, with reference especially to diatoms, *Limnology and Oceanology*, 1973, no. 18(4), p. 647–653.
- Bjarnadóttir L.R., Winsborrow M.C.M., Andreassen K. Deglaciation of the central Barents Sea, *Quaternary Science Reviews*, 2014, vol. 92, p. 208–226.
- Braak ter C.J.F., Smilauer P. Canoco reference manual and user's guide: software for ordination (version 5.10), NY, USA, Microcomputer Power, 1998. 536 p.
- Buckley M.W., Marshall J. Observations, inferences, and mechanisms of the Atlantic meridional overturning circulation: a review, *Rev. Geophys.*, 2016, vol. 54, p. 5–63.
- Horner R. Arctic sea-ice biota, *The Arctic Seas. Climatology, Oceanography. Geology, and Biology*, Y. Herman (ed.), New York, Van Nostrand Reinhold Company, 1989, p. 123–146.
- Johannessen O., Bobylev L., Shalina E. et al. Sea Ice in the Arctic Past, Present and Future, Berlin, Heidelberg, Germany, Springer, 2019, 575 p., DOI: 10.1007/978-3-030-21301-5.
- Keghouche L., Counillon F., Bertino L. Modeling dynamics and thermodynamics of icebergs in the Barents Sea from 1987 to 2005, *Journal of Geophysical Research*, 2010, vol. 115, C12062, p. 1–14.
- Koç Karpuz N., Schrader H. Surface sediment diatom distribution and Holocene paleo-temperature variations in the Greenland, Iceland and Norwegian Sea, *Paleoceanography*, 1990, vol. 5, p. 557–580.
- Lind S., Ingvaldsen R.B. Variability and impacts of Atlantic Water entering the Barents Sea from the north, *Deep Sea Res. I.*, 2012, vol. 62, p. 70–88.
- Loeng H. Features of the physical oceanographic conditions of the Barents Sea, *Polar Res.*, 1991, vol. 10, p. 5–18.
- Matul A.G., Novichkova E.A., Klyuvitkina T.S. et al. Paleoceanology of the Norwegian-Greenland Basin in the Middle-Late Holocene based on the microfossil distribution, *Paleontological Journal*, 2024, vol. 58, no. 7, p. 745–751.
- Miettinen A., Koç N., Husum K. Appearance of the Pacific diatom *Neodenticula seminae* in the northern Nordic Seas – An indication of changes in Arctic Sea ice and ocean circulation, *Marine Micropaleontology*, 2013, vol. 99, p. 2–7.
- Miettinen A., Divine D.V., Husum K. et al. Exceptional Ocean surface conditions on the SE Greenland shelf during the Medieval Climate Anomaly, *Paleoceanography*, 2015, vol. 30, p. 1657–1674, DOI: 10.1002/2015PA002849.
- Oksman M., Juggins S., Miettinen A. et al. The biogeography and ecology of common diatom species in the northern North Atlantic, and their implications for paleoceanographic reconstructions, *Marine Micropalaeontology*, 2019, no. 148, p. 1–28, DOI: 10.1016/j.marmicro.2019.02.002.
- Pautova L., Kravchishina M., Silkin V. et al. The Influence of the Atlantic Water Boundary Current on the Phytoplankton Composition and Biomass in the Northern Barents Sea and the Adjacent Nansen Basin, *J. Mar. Sci. Eng.*, 2024, vol. 12, 1678, DOI: 10.3390/jmse12091678.
- Polyakov I., Pnyushkov A., Alkire M. et al. Greater role for Atlantic inflows on sea-ice loss in the Eurasian Basin of the Arctic Ocean, *Science*, 2017, vol. 356, no. 6335, p. 285–291.
- Polyakova Ye.I. Diatom assemblages in the surface sediments of the Kara Sea (Siberian Arctic) and their relationship to oceanological conditions, *Siberian River Run-off in the Kara Sea: Characterization, Quantification, Variability, and Environmental Significance*, Proceedings in Marine Sciences, R. Stein, K. Fahl, D.K. Fütterer, E.M. Galimov, O.V. Stepanets (eds.), Amsterdam, Elsevier, 2003, p. 375–399.
- Poulin M. Ice Diatoms: the Arctic, *Polar Marine Diatoms*, L. Medlin and J. Priddle (eds.), Cambridge, British Antarctic Survey, Natural Environment Res., 1990, p. 15–18.
- Rat'kova T., Wassmann P. Seasonal variation and spatial distribution of phytoplankton protozooplankton in the central Barents Sea, *Journ. Marine Syst.*, 2002, vol. 38, p. 47–75.
- Reid P., Johns D., Edwards M. et al. A biological consequence of reducing Arctic ice cover: Arrival of the Pacific diatom *Neodenticula seminae* in the North Atlantic for the first time in 800 000 years, *Global Change Biology*, 2007, vol. 13, p. 1910–1921.
- Riesebroakken B., Moros M., Ivanova E.V. et al. Climate and oceanographic variability in the SW Barents Sea during the Holocene, *Holocene*, 2010, vol. 20, no. 4, p. 609–621, DOI: 10.1177/0959683609356586.
- Stroeve J.C., Holland M.M., Meier W. et al. Arctic Sea ice decline: Faster than forecast, *Geophys. Res. Lett.*, 2007, 34, L09501, DOI: 10.1029/2007GL029703.
- Strong C., Rigor I.G. Arctic marginal ice zone trending wider in summer and narrower in winter, *Geophys. Res. Lett.*, 2013, vol. 40, p. 4864–4868, DOI: 10.1002/grl.50928, 2013.
- von Quillfeldt C.H. Distribution of diatoms in the Northern Water Polynya, Greenland, *Journal of Marine Systems*, 1997, no. 10, p. 211–240.

Электронные источники

- Garcia H.E., Boyer T.P., Baranova O.K. et al. World Ocean Atlas 2018: Product Documentation. A. Mishonov, Technical Editor, URL: <https://www.ncei.noaa.gov/> (дата обращения 05.05.2025).
- Norsk Polarinstittutt. The sea ice frequency in the Norwegian Arctic, monthly for 1993–2022, URL: <https://npolar.no/en/themes/the-marginal-ice-zone/> (дата обращения 05.05.2025).
- U.S. National Ice Center. 2020. U.S. National Ice Center Arctic and Antarctic Sea Ice Concentration and Climatologies in Gridded Format (G10033, Version 1), F. Fetterer & J.S. Stewart (comps.) [Data Set], Boulder, Colorado USA, National Snow and Ice Data Center, DOI: 10.7265/46cc-3952 (дата обращения 05.05.2025).
- ЕСИМО ААНИИ, URL: <https://www.aari.ru/departments/tsentr-ledovoi-gidrometeorologicheskoi-informatsii> (дата обращения 05.05.2025).

Поступила в редакцию 22.08.2025

После доработки 23.09.2025

Принята к публикации 17.10.2025

INVASIVE DIATOMS IN THE SURFACE LAYER OF BOTTOM SEDIMENTS IN THE NORWEGIAN, GREENLAND AND BARENTS SEAS AND THEIR POSSIBLE APPLICATION FOR PALEOCEANOGRAPHIC RECONSTRUCTIONS

E.A. Agafonova¹, M.D. Kravchishina²

^{1,2} Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences, Lisitzin Laboratory of Physical-Geological Studies

¹ Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: agafonova.ea@ocean.ru

² Leading Scientific Researcher, Ph.D. in Geology and Mineralogy; e-mail: kravchishina@ocean.ru

The paper presents the results of studying the invasive diatom species in the sediments' surface layer of the Norwegian, Greenland and Barents seas. The Redundancy Analysis (RDA) method helped to identify the main environmental factors influencing the distribution of invasive diatoms. The duration of sea-ice cover and the position of the marginal ice zone within the study area are the principal ones. The geographic distribution of invasive diatom species was established. The North Pacific species *Neodenticula seminae* was found only in the North Atlantic, its distribution is limited to 12–15° EL. The presence of relatively warm-water diatom species *Shionodiscus oestrupii*, *Coscinodiscus radiatus* and *C. asteromphalus* is associated with the penetration of warm Atlantic currents. The distribution of sea-ice and ice-neritic species directly depends on the location of the seasonal sea-ice cover. High contents of sea-ice (up to 30%) and ice-neritic (more than 45%) diatom species in sediments may indicate the proximity of the sea ice boundary in the recent geological past, while low contents (about 2 and 15%, respectively) indicate their invasion by currents or as a result of iceberg transport. The results show that invasive diatom species could be used as paleomarkers of the paleoceanological changes, affecting the intensity of warm Atlantic water influx into the Arctic, and the boundaries of seasonal sea-ice cover and the marginal ice zone.

Keywords: Norwegian-Greenland Basin, Barents Sea, methods of paleoreconstructions, diatoms

Acknowledgements. The research was financially supported by the Russian Science Foundation (project No. 24-77-00025, <https://rscf.ru/en/project/24-77-00025/>), with additional support under the State Assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for IO RAS, theme No. FMWE-2024-0020 (field studies and sampling).

Field studies were carried out using the equipment of the unique scientific facility RV “Akademik Mstislav Keldysh” as a part of the Center for the collective use of scientific equipment “Scientific fleet of IO RAS” (<https://rv.ocean.ru/flot/abf/nis-akademik-mstislav-keldysh>). The authors are grateful to the crew of the RV “Akademik Mstislav Keldysh” and all members of the expedition and especially thank N.V. Kozina for her assistance in collecting sediment samples.

REFERENCES

- Agafonova E.A., Klyuvitkin A.A., Novigatsky A.N. et al. Invasive Diatom Species in Sinking Material of the Lofoten Basin (the Norwegian Sea), *Doklady Earth Sciences*, 2025, vol. 524, no. 3, DOI: 10.1134/S1028334X25606443.
- Agafonova E., Novichkova E., Novigatsky A. et al. Diatom and dinocyst production, composition and flux from the annual cycle sediment trap study in the Barents Sea, *Geosciences*, 2023, no. 13(1), DOI: 10.3390/geosciences13010001.
- Aksenov Y., Popova E.E., Yool A. et al. On the future navigability of Arctic Sea routes: High-resolution projections of the Arctic Ocean and sea ice, *Mar. Pol.*, 2017, vol. 75, p. 300–317, DOI: 10.1016/j.marpol.2015.12.027.
- Andersen C., Koç N., Jennings A. et al. Nonuniform response of the major surface currents in the Nordic Seas to insolation forcing: Implications for the Holocene climate variability, *Paleoceanography*, 2004, no. 19, PA2003, DOI: 10.1029/2002PA000873.
- Ardyna M., Babin M., Gosselin M. et al. Fall Phytoplankton Blooms, *Geophys. Res. Lett.*, 2014, vol. 41, p. 6207–6212.
- Battarbee R.W. A new method for the estimation of absolute microfossil numbers, with reference especially to diatoms, *Limnology and Oceanology*, 1973, no. 18(4), p. 647–653.
- Bjarnadóttir L.R., Winsborrow M.C.M., Andreassen K. Deglaciation of the central Barents Sea, *Quaternary Science Reviews*, 2014, vol. 92, p. 208–226.
- Braak ter C.J.F., Smilauer P. *Canoco reference manual and user's guide: software for ordination (version 5.10)*, NY, USA, Microcomputer Power, 1998, 536 p.
- Buckley M.W., Marshall J. Observations, inferences, and mechanisms of the Atlantic meridional overturning circulation: a review, *Rev. Geophys.*, 2016, vol. 54, p. 5–63.
- Diatomovye vodorosli SSSR (iskopaemye i sovremennyye), t. I* [The diatoms of the USSR (fossil and recent), vol. 1], A.I. Proshkina-Lavrenko (ed.), Leningrad, Nauka Publ., 1974, 403 p. (In Russian)
- Horner R. Arctic sea-ice biota, *The Arctic Seas. Climatology, Oceanography, Geology, and Biology*, Y. Herman (ed.), New York, Van Nostrand Reinhold Company, 1989, p. 123–146.
- Ivanova E.V., Murdmaa I.O. [Postglacial paleoceanology of the Barents Sea], *Sistema Barentseva morya* [The Barents Sea System], A.P. Lisitzin (ed.), Moscow, GEOS Publ.,

- 2021, 109–126, DOI: 10.29006/978-5-6045110-0-8/(10). (In Russian)
- Johannessen O., Bobylev L., Shalina E. et al. *Sea Ice in the Arctic Past, Present and Future*, Berlin, Heidelberg, Germany, Springer, 2019, 575 p., URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-21301-5>.
- Keghouche I., Counillon F., Bertino L. Modeling dynamics and thermodynamics of icebergs in the Barents Sea from 1987 to 2005, *Journal of Geophysical Research*, 2010, vol. 115, C12062, p. 1–14.
- Klyuvitkin A.A., Kravchishina M.D., Nemirovskaya I.A. et al. Studies of sediment systems of the European Arctic during the 75th Cruise of the R/V “Akademik Mstislav Keldysh”, *Oceanology*, 2020, no. 60(3), p. 421–423.
- Koç Karpuz N., Schrader H. Surface sediment diatom distribution and Holocene paleo-temperature variations in the Greenland, Iceland and Norwegian Sea, *Paleoceanography*, 1990, vol. 5, p. 557–580.
- Kravchishina M.D., Novigatskii A.N., Savvichev A.S. et al. Sedimentation systems definition of the Barents Sea and Norwegian-Greenland basin during 68th cruise of the research vessel Academic Mstislav Keldysh, *Oceanology*, 2019, no. 59(1), p. 173–176.
- Lind S., Ingvaldsen R.B. Variability and impacts of Atlantic Water entering the Barents Sea from the north, *Deep Sea Res.*, I, 2012, vol. 62, p. 70–88.
- Loeng H. Features of the physical oceanographic conditions of the Barents Sea, *Polar Res.*, 1991, 10, 5–18.
- Matul A.G., Novichkova E.A., Klyuvitkina T.S. et al. Paleo-oceanology of the Norwegian-Greenland Basin in the Middle-Late Holocene based on the microfossil distribution, *Paleontological Journal*, 2024, vol. 58, no. 7, p. 745–751.
- Maznev S.V., Kokin O.V., Arkhipov V.V. et al. Modern and Relict Evidence of Iceberg Scouring at the Bottom of the Barents and Kara Seas, *Oceanology*, 2023, no. 63(1), p. 84–94, DOI: 10.1134/S0001437023010113.
- Miettinen A., Divine D.V., Husum K. et al. Exceptional Ocean surface conditions on the SE Greenland shelf during the Medieval Climate Anomaly, *Paleoceanography*, 2015, vol. 30, p. 1657–1674, DOI: 10.1002/2015PA002849.
- Miettinen A., Koç N., Husum K. Appearance of the Pacific diatom *Neodenticula seminae* in the northern Nordic Seas – An indication of changes in Arctic Sea ice and ocean circulation, *Marine Micropaleontology*, 2013, vol. 99, p. 2–7.
- Oksman M., Juggins S., Miettinen A. et al. The biogeography and ecology of common diatom species in the northern North Atlantic, and their implications for paleo-oceanographic reconstructions, *Marine Micropaleontology*, 2019, no. 148, p. 1–28, DOI: 10.1016/j.marmicro.2019.02.002.
- Pautova L., Kravchishina M., Silkin V. et al. The Influence of the Atlantic Water Boundary Current on the Phytoplankton Composition and Biomass in the Northern Barents Sea and the Adjacent Nansen Basin, *J. Mar. Sci. Eng.*, 2024, 12, 1678, URL: <https://doi.org/10.3390/jmse12091678>.
- Pautova L.A. [Phytoplankton of the Barents Sea], *Sistema Barentseva morya* [The Barents Sea System], A.P. Lisitzin (ed.), Moscow, GEOS Publ., 2021, p. 317–330. DOI: 10.29006/978-5-6045110-0-8/(25). (In Russian)
- Pisarev S.V. [Review of the Barents Sea hydrological conditions], *Sistema Barentseva morya* [The Barents Sea System], A.P. Lisitzin (ed.), Moscow, GEOS Publ., 2021, p. 153–166, URL: [https://doi.org/10.29006/978-56045110-0-8/\(13\)](https://doi.org/10.29006/978-56045110-0-8/(13)). (In Russian)
- Polyakov I., Pnyushkov A., Alkire M. et al. Greater role for Atlantic inflows on sea-ice loss in the Eurasian Basin of the Arctic Ocean, *Science*, 2017, vol. 356, no. 6335, p. 285–291.
- Polyakova E.I. *Arkticheskie morya Evrazii v pozdnem kainozoe* [Arctic seas of Eurasia in the late Cenozoic], Moscow, Nauchnyi mir Publ., 1997, 145 p. (In Russian)
- Polyakova Ye.I. Diatom assemblages in the surface sediments of the Kara Sea (Siberian Arctic) and their relationship to oceanological conditions, *Siberian River Run-off in the Kara Sea: Characterization, Quantification, Variability, and Environmental Significance*, Proceedings in Marine Sciences, R. Stein, K. Fahl, D.K. Fütterer, E.M. Galimov, O.V. Stepanets (eds.), Amsterdam, Elsevier, 2003, p. 375–399.
- Polyakova Y.I., Novichkova E.A., Agafonova E.A. [Diatoms and aquatic palynomorphs in the bottom sediments of the Barents Sea: Main patterns of distribution and use in paleo-oceanological studies], *Sistema Barentseva morya* [The Barents Sea System], A.P. Lisitzin (ed.), Moscow, GEOS Publ., 2021, p. 64–95, DOI: 10.29006/978-5-6045110-0-8/(8). (In Russian)
- Poulin M. Ice Diatoms: the Arctic, *Polar Marine Diatoms*, L. Medlin and J. Priddle (eds.), Cambridge, British Antarctic Survey, Natural Environment Res., 1990, p. 15–18.
- Rat'kova T., Wassmann P. Seasonal variation and spatial distribution of phytoplankton protozooplankton in the central Barents Sea, *Journ. Marine Syst.*, 2002, 38, p. 47–75.
- Reid P., Johns D., Edwards M. et al. A biological consequence of reducing Arctic ice cover: Arrival of the Pacific diatom *Neodenticula seminae* in the North Atlantic for the first time in 800 000 years, *Global Change Biology*, 2007, vol. 13, p. 1910–1921.
- Risebrobakken B., Moros M., Ivanova E.V. et al. Climate and oceanographic variability in the SW Barents Sea during the Holocene, *Holocene*, 2010, vol. 20, no. 4, p. 609–621, DOI: 10.1177/0959683609356586.
- Roukhiyainen M.I. [Qualitative composition of phytoplankton in the Barents Sea], *Sostav i raspredelenie planktona i bentosa yuzhnoi chasti Barentseva morya* [Composition and distribution of plankton and benthos in the southern part of the Barents Sea.], Moscow, Leningrad, Nauka Publ., 1966, p. 3–23. (In Russian)
- Sistema Barentseva morya* [The Barents Sea System], A.P. Lisitzin (ed.), Moscow, GEOS Publ., 2021, 672 p. (In Russian)
- Stroeve J.C., Holland M.M., Meier W. et al. Arctic Sea ice decline: Faster than forecast, *Geophys. Res. Lett.*, 2007, 34, L09501, URL: <https://doi.org/10.1029/2007GL029703>.
- Strong C., Rigor I.G. Arctic marginal ice zone trending wider in summer and narrower in winter, *Geophys. Res. Lett.*, 2013, 40, p. 4864–4868, URL: <https://doi.org/10.1002/grl.50928>, 2013.
- von Quillfeldt C.H. Distribution of diatoms in the Northern Water Polynya, Greenland, *Journal of Marine Systems*, 1997, no. 10, p. 211–240.

Web sources

ESIMO AANII, URL: <https://www.aari.ru/departments/tsentr-ledovoi-gidrometeorologicheskoi-informatsii> (access date 05.05.2025).

- Garcia H.E., Boyer T.P., Baranova O.K. et al. 2019, World Ocean Atlas 2018, Product Documentation, A. Mishonov, Technical Editor, URL: <https://www.ncei.noaa.gov/> (access date 05.05.2025).
- Norsk Polarinstitutt. The sea ice frequency in the Norwegian Arctic, monthly for 1993–2022, URL: <https://npolar.no/en/themes/the-marginal-ice-zone/> (access date 05.05.2025).
- U.S. National Ice Center, 2020, U.S. National Ice Center Arctic and Antarctic Sea Ice Concentration and Climatologies in Gridded Format (G10033, Version 1), F. Fetterer & J.S. Stewart (comps.) [Data Set], Boulder, Colorado USA. National Snow and Ice Data Center, URL: <https://doi.org/10.7265/46cc-3952> (access date 05.05.2025).

Received 22.08.2025

Revised 23.09.2025

Accepted 17.10.2025