

УДК 550.47,552.14,550.42,579,574.5

СИСТЕМНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОСАДКООБРАЗОВАНИЯ В ЕВРОПЕЙСКОЙ АРКТИКЕ В 84-м РЕЙСЕ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО СУДНА “АКАДЕМИК МСТИСЛАВ КЕЛДЫШ”

© 2022 г. М. Д. Кравчишина¹, *, А. А. Кловиткин¹, В. Д. Володин², Д. И. Глуховец¹,
Е. О. Дубинина³, И. А. Круглинский⁴, Е. А. Кудрявцева¹, А. Г. Матуль¹, Е. А. Новичкова¹,
Н. В. Политова¹, А. С. Саввичев⁵, В. А. Силкин¹, Д. П. Стародымова¹

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН,
Москва, Россия

²Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН,
Москва, Россия

³Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН,
Москва, Россия

⁴Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия

⁵Институт микробиологии им. С.Н. Виноградского, ФИЦ Биотехнологии РАН,
Москва, Россия

*e-mail: kravchishina@ocean.ru

Поступила в редакцию 31.01.2022 г.

После доработки 02.02.2022 г.

Принята к публикации 25.02.2022 г.

В экспедиции выполнялись исследования условий и процессов палео- и современной седиментации с оценкой потоков вещества и загрязнений, с определением скоростей биогеохимических процессов и региональными палеоклиматическими реконструкциями в области контакта холодной полярной и теплой атлантической водных масс под влиянием холодных (сиповых) и горячих (гидротермальных) флюидов в Норвежско-Гренландском бассейне и Баренцевом море. Фиксируются следствия атлантификации во всех составляющих геосистем Баренцева моря и Высокой Арктики, а также обратное влияние арктического усиления на геосистемы субполярной Северной Атлантики, происходящие как в настоящее время, так и в плейстоцене—голоцене.

Ключевые слова: Баренцево море, Норвежско-Гренландский бассейн, пролив Фрама, метан, аэрозоли, взвесь, стабильные изотопы, биогеохимия, палеоокеанология

DOI: 10.31857/S0030157422040062

Усиление притока теплой и плотной воды из Северной Атлантики (АВ) в Арктику последние ~20 лет, привело к сокращению ледяного покрова и уменьшению толщины льда в высоких широтах [5]. Баренцево море и Норвежско-Гренландский бассейн — ключевой регион для трансформации водных масс в “арктическом средиземноморье”. Междисциплинарные исследования роли осадочного вещества взаимодействующих геосфер в осадкообразовании в области контакта холодной полярной и теплой атлантической водных масс с позиций системного подхода проводятся нами с 2015 г. [5]. Работы направлены на развитие идей, заложенных научной школой академика А.П. Лисицына [3]. В экспедиции “Европейская Арктика—2021” (24 июля—26 августа 2021 г.) вы-

полнены комплексные работы на 68 станциях и непрерывные измерения параметров среды на границе океан—атмосфера по маршруту судна (рис. 1).

Приводный слой атмосферы. Изучены концентрации и изотопный состав углерода основных парниковых газов в атмосфере по пути судна. Концентрация метана варьировала от 1.91 до 2.01 ppm; зоны устойчивого повышения концентрации наблюдались над Восточно-Гренландским хребтом (трансформный разлом) и трогом Орли. Максимальные значения аэрозольной оптической толщи атмосферы наблюдались в проливе Фрама, что связано с переносом продуктов извержения вулканической системы в Исландии. Изучены ха-

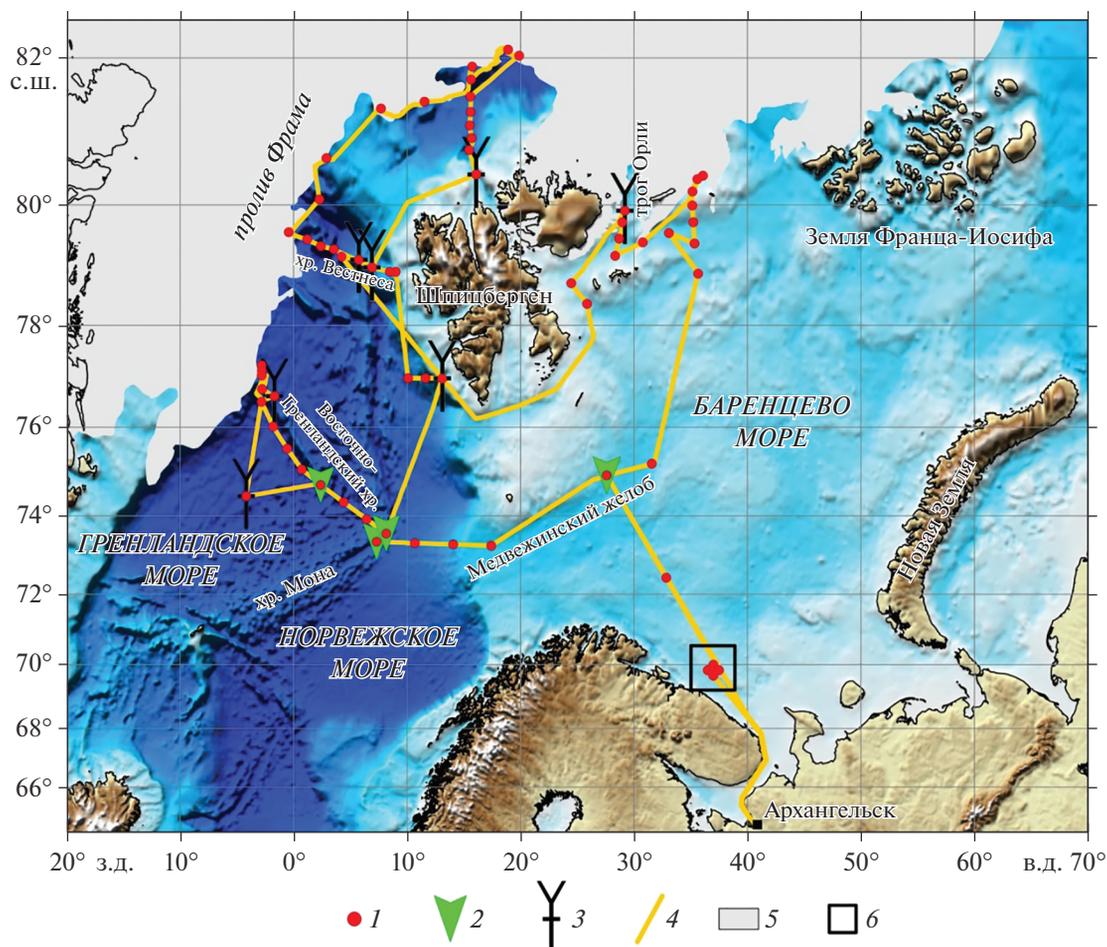


Рис. 1. Картограмма комплексных океанологических станций и маршрута экспедиции “Европейская Арктика – 2021” с анализом ледовой обстановки на момент работы у кромки льда по данным Норвежского метеорологического института (<https://cguo.met.no/>): 1 – комплексные станции (выполнялся весь комплекс работ); 2 – комплексные станции с АГОС; 3 – комплексные станции с отбором длинных (до 5.55 м) колонок осадков; 4 – путь судна; 5 – морской лед; 6 – полигон по изучению характеристик цветения кокколитофорид.

рактические сажи в частицах аэрозоля, что необходимо для оценки радиационного баланса.

Оптические характеристики водной толщи. Реализован комплексный подход к исследованию поверхностного слоя океана, сочетающий судовые контактные измерения и спутниковые наблюдения с разработкой региональных алгоритмов анализа спутниковых данных [2]. По данным измерений, выполненных с помощью проточного комплекса у кромки льда, показано существование областей таяния и замерзания морского льда.

Изотопно-геохимические ($\delta^{18}\text{O}$, δD , $\delta^{13}\text{C}(\text{DIC})$, [DIC]) параметры вод Европейской Арктики изучены с помощью комплексного высокоточного изотопно-геохимического метода с целью исследования эволюции изотопных характеристик АВ в процессе их поступления. В изученном районе сохраняется типичный для Северной Атлантики вертикальный профиль распределения величин

$\delta^{13}\text{C}(\text{DIC})$ [7] с минимумом (0.5–0.8‰) на глубинах 100–500 м и максимумом в поверхностном слое вод (<50 м).

Взвесь водной толщи изучена комплексом методов [4, 5]; выявлены особенности формирования взвесенесущих и нефелоидных слоев в разных обстановках седиментации: у ледяной кромки, в трогах–желобах и др. В Норвежско-Гренландском бассейне концентрации взвеси варьировали от 0.04 до 0.71 мг/л и были близки к таковым для районов океана с фоновой пелагической седиментацией; в Баренцевом море – от 0.06 до 1.3 мг/л и были характерны для летнего сезона в данном регионе.

Изучение автохтонной составляющей взвеси выявило изменения в фитопланктонном звене Европейской Арктики: на смену диатомовым – представителям флоры многолетних льдов – пришли виды, характерные для однолетних льдов, а также виды “открытой воды”, заносимые АВ. Ис-

следования у кромки ледяных полей, где первичная продукция (ПП) достигала $992 \text{ мгС м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$ (трог Орли), показали, что не менее половины ПП и концентрации хлорофилла “а” в фотическом слое приходится на фракцию пикопланктона (клетки $< 2 \text{ мкм}$), а доля “диатомовой” фракции $> 10 \text{ мкм}$ возрастает в области галоклина.

Вертикальные потоки осадочного вещества по данным автоматических глубоководных седиментационных обсерваторий (АГОС). На гидротермальном поле Локи Касл (хребт Мона) впервые оценены величины потока частиц (до $148 \text{ мг/м}^2/\text{сут.}$). Высокие потоки вещества и мощный (до $\sim 250 \text{ м}$) нефелоидный слой связаны с влиянием гидротермального плюма. Дальний перенос вещества плюма нейтральной плавучести от неустановленного источника [1] подтверждается данными годовой АГОС на хребте Мона в 35 км от поля Локи Касл. Новая долговременная АГОС установлена в “фоновом” районе Гренландского моря за пределами хребта, где ПП достигала $825 \text{ мгС м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$. Впервые изучены потоки частиц в “кратере” Медвежинского желоба, образовавшемся в результате масштабного выброса метана при отступлении ледникового щита [6].

Литолого-геохимические и биогеохимические исследования выполнены в районах проявления акустических аномалий в водной толще, связанных со струйно-пузырьковыми выходами метана. Вскрыты газонасыщенные осадки покмарков хребта Вестнеса [8], содержащие пластины газогидрата и аутигенные карбонаты, образованные при участии метана. Положение зоны транзита сульфат–метан в колонках подтверждается ростом щелочности и снижением концентрации сульфат-иона в иловой воде и наличием “баритового фронта” (аутигенного барита) над этой зоной. Среднее значение $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$ в осадках составило -59.2% VPDB, что подтверждает преобладание термогенного источника в составе флюида. Получены новые данные по эволюции просачивания метаносодержащих флюидов за последние ~ 35 тыс. лет.

Палеоокеанологические исследования проведены для реконструкции изменений арктического края меридиональной океанской циркуляции в Норвежско-Гренландском бассейне и акваториях Шпицбергена в четвертичное время с детализацией за последние 15 тыс. лет. Получены новые данные о несинхронности наступления максимума видового разнообразия микрофоссилий по мере продвижения АВ на север во время деградации ледника.

Эколого-геохимические исследования. Наибольшие концентрации микропластика (до 400 частиц/час) в верхнем слое воды, полученные с помощью проточного анализатора ГЕОХИ РАН, были отмечены у восточных берегов Шпицбергена.

Активность ^{137}Cs в поверхностной воде (экспресс-анализ с помощью портативного сцинтилляционного гамма-спектрометра) не превышала ее минимально детектируемого значения ($< 3.5 \text{ Бк/м}^3$), что соответствует текущей благополучной радиационной обстановке в Арктике.

Благодарности. Авторы благодарят капитана Ю.Н. Горбача, экипаж НИС “Академик Мстислав Келдыш” и всех членов экспедиции за помощь и активное участие в проведении исследований.

Источники финансирования. Экспедиция проведена при финансовой поддержке Минобрнауки России. Исследования выполнялись в рамках госзадания (тема № FMWE-2021-0006). Участие коллектива в экспедиции поддержано Российским научным фондом, проекты №№ 20-17-00157 (исследования на гидротермах и сипах), 21-17-00235 (палеоокеанологические исследования), 21-77-10059 (гидрооптические исследования) и 21-77-20025 (исследования аэрозолей).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богданов Ю.А., Сагалевич А.М., Галкин С.В. и др. Геологические и биологические исследования в северной части хребта Мона (Норвежское море) // Океанология. 1997. Т. 37. № 4. С. 609–616.
2. Глуховец Д.И., Копелевич О.В., Салинг И.В. и др. Биооптические характеристики вод поверхностного слоя Балтийского, Норвежского и Баренцева морей по судовым и спутниковым данным летом 2014–2016 гг. // Океанология. 2017. Т. 57. № 3. С. 454–463.
3. Лисицын А.П. Современные представления об осадкообразовании в океанах и морях. Океан как природный самописец взаимодействия геосфер Земли // Мировой океан. Т. II. М.: Научный мир, 2014. С. 331–571.
4. Лохов А.С., Кравчишина М.Д., Кловиткин А.А., Коченкова А.И. Измерение характеристик взвешенных частиц Баренцева моря *in situ* с помощью лазерного дифрактометра LISST-Deep // Океанология. 2020. Т. 60. № 5. С. 747–761.
5. Система Баренцева моря / А.П. Лисицын отв. ред. Москва: ГЕОС, 2021. 672 с. <https://doi.org/10.29006/978-5-6045110-0-8>.
6. Andreassen K., Hubbard A., Winsborrow M. et al. Massive blow-out craters formed by hydrate-controlled methane expulsion from the Arctic seafloor // Science. 2017. V. 365. Is. 6341. P. 948–953.
7. Kroopnick P.M. The distribution of ^{13}C of ΣCO_2 in the world oceans // Deep-Sea Research. 1985. V. 32. № I. P. 57–84.
8. Sauer S., Hong W.L., Yao H. et al. Methane transport and sources in an Arctic deep-water cold seep offshore NW Svalbard (Vestnesa Ridge, 79°N) // Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers. 2021. V. 167. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2020.103430>

Systems Research of Sedimentation in the European Arctic in the 84th Cruise of the Research Vessel *Akademik Mstislav Keldysh*

M. D. Kravchishina^{a, #}, A. A. Klyuvitkin^a, V. D. Volodin^b, D. I. Glukhovets^a, E. O. Dubinina^c, I. A. Kruglinskii^d, E. A. Kudryavtseva^a, A. G. Matul^a, E. A. Novichkova^a, N. V. Politova^a, A. S. Savvichev^e, V. A. Silkin^a, D. P. Starodymova^a

^a*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

^b*Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

^c*Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy, and Geochemistry, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

^d*Zuev Institute of Atmospheric Optics, Russian Academy of Science, Siberian Branch, Tomsk, Russia*

^e*Federal Research Centre "Fundamentals of Biotechnology", Winogradsky Institute of Microbiology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

[#]*e-mail: kravchishina@ocean.ru*

Research of conditions and processes of paleo- and modern sedimentation with an assessment of particles and pollution fluxes, with determination of the rates of biogeochemical processes and regional paleoclimatic reconstructions in the contact area of cold Polar and warm Atlantic water masses under the influence of cold (seep) and hot (hydrothermal) fluids were carried out in the expedition in the Norwegian-Greenland Basin and the Barents Sea. The consequences of atlantification are recorded in all components of the geosystems of the Barents Sea and the High Arctic as well as the reverse effect of the Arctic amplification on the geosystems of the subpolar North Atlantic occurring both at the present time and in the Pleistocene and Holocene.

Keywords: Barents Sea, Norwegian-Greenland Basin, Fram Strait, methane, aerosols, suspended particulate matter, stable isotopes, biogeochemistry, paleoceanology