

УДК 550.47, 552.14, 550.42, 579, 574.5

93-й РЕЙС НИС “АКАДЕМИК МСТИСЛАВ КЕЛДЫШ”: ГЕОСИСТЕМЫ ЗАПАДНО-АРКТИЧЕСКОГО ШЕЛЬФА ЕВРАЗИИ В СЕЗОН АКТИВНОГО РАЗВИТИЯ ОСЕННЕ-ЗИМНЕЙ КОНВЕКЦИИ И ПОЛЯРНОЙ НОЧИ

© 2024 г. М. Д. Кравчишина^{1, *}, А. А. Клювиткин¹, А. Н. Новигатский¹,
А. Г. Матуль¹, В. В. Иванов², Д. А. Пестунов³, Ю. А. Штабкин⁴,
Б. В. Баранов¹, С. В. Галкин¹, А. К. Амбросимов¹, Н. В. Козина¹,
О. Н. Лукьянова¹, И. А. Немировская¹

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

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

³ Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия

⁴ Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

* e-mail: kravchishina@ocean.ru

Поступила в редакцию 07.03.2024 г.

После доработки 07.03.2024 г.

Принята к публикации 16.04.2024 г.

В экспедиции “Европейская Арктика–2023: геологическая летопись изменений среды и климата” выполнены междисциплинарные исследования системы “донные осадки–водная толща–приводный слой атмосферы” в Баренцевом, Печорском морях и Байдарацкой губе Карского моря в сезон полярной ночи и активного развития осенне-зимней термической конвекции. По ряду направлений получены принципиально новые данные.

Ключевые слова: седиментация, биогеохимия, климат, метан, палеоокеанология, Арктика

DOI: 10.31857/S0030157424040173, **EDN:** PQIXCI

Экспедиция “Европейская Арктика–2023: геологическая летопись изменений среды и климата” проводилась в рамках программы Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН по исследованию осадкообразования, колебаний климата и региональных особенностей эмиссии метана в области контакта холодной арктической и теплой атлантической воды [6]. Европейская Арктика, включающая Баренцево море и пролив Фрама, — ключевой регион глобального океанического конвейера, процессы в котором определяли климат и условия окружающей среды во всем “арктическом средиземноморье” и северном полушарии в плейстоцене и, особенно выразительно, в последние 16–17 тыс. лет на переходе от последнего оледенения плейстоцена к современному межледниковью голоцена. Сокращение ледяного покрова и таяние ледников на островах Арктики в XXI в. можно рассматривать в качестве современного периода регионального перигляциала [6] — аналога неоднократно проявляющихся периодов потепления в голоцене [2].

Исследования выполнялись в период полярной ночи с 8 ноября по 7 декабря 2023 г. в Баренцевом, Печорском морях и Байдарацкой губе Карского моря (рис. 1) как на ходу судна по всему маршруту протяженностью ~4000 морских миль, так и на 124-х комплексных океанологических станциях. Усилиями междисциплинарного коллектива реализованы совокупные исследования донных осадков, водной толщи и приводного слоя атмосферы, в том числе, для решения задач по созданию системы мониторинга климатических изменений и климатически активных веществ согласно Распоряжению Правительства РФ от 29.10.2022 № 3240-р [1, 5]. Приведем лишь отдельные важные и принципиально новые результаты.

Впервые с применением камерного метода выполнено 273 измерения потоков газов на границе вода–атмосфера на базе газоанализатора CO₂/CH₄/H₂O Picarro G4301 [10] на 79 станциях. Зафиксирована эмиссия метана в атмосферу благодаря молекулярной диффузии интенсивностью

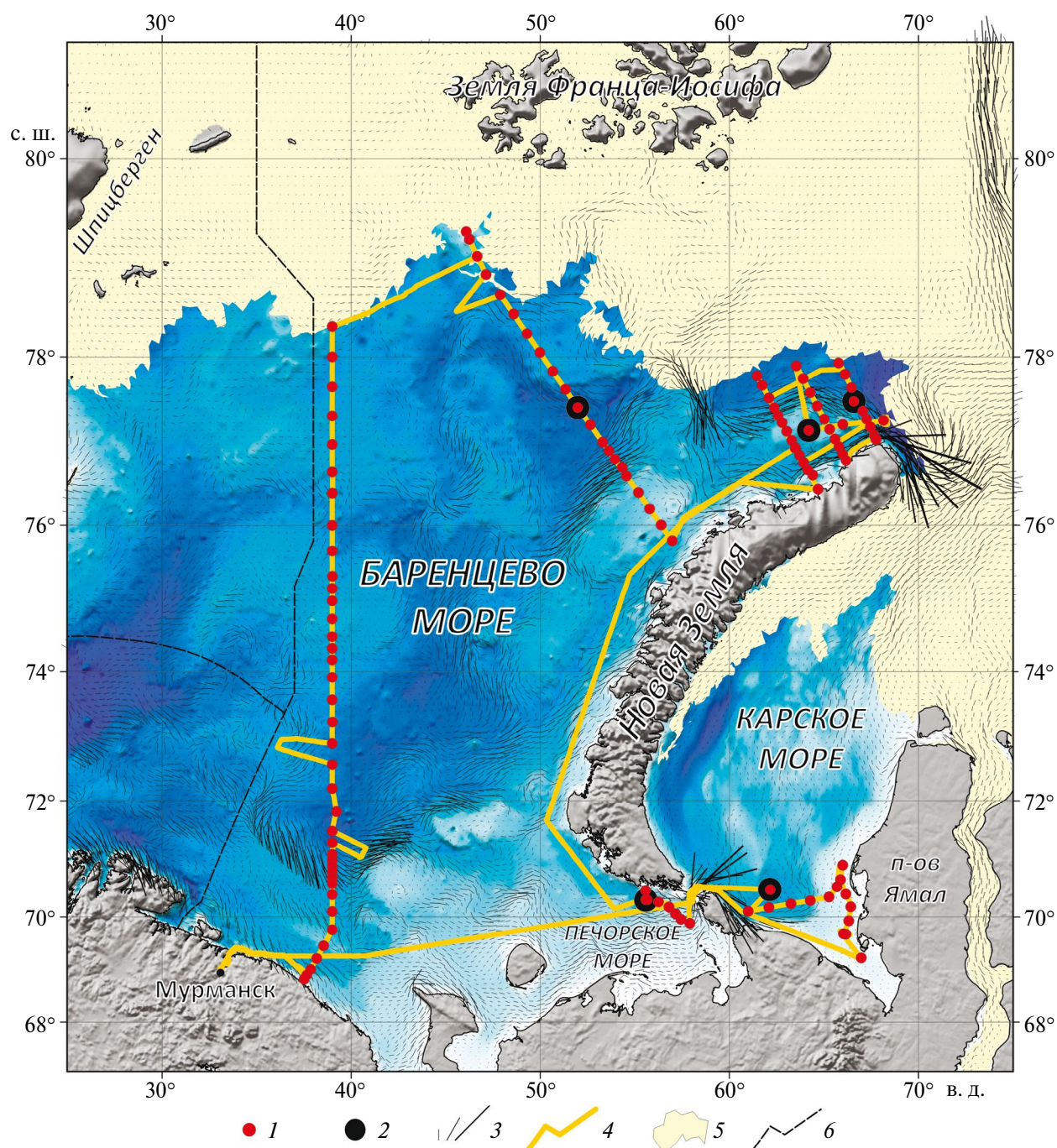


Рис. 1. Карта маршрута экспедиции и океанологических станций в российской части Западно-Арктического шельфа Евразии, ноябрь–декабрь 2023 г.: 1 – станции комплексные; 2 – станции комплексные с отбором колонок осадков с помощью геологической ударной трубки большого диаметра; 3 – векторы течений; 4 – маршрут судна; 5 – ледяной покров; 6 – границы экономических зон РФ и Норвегии, рыбоохранной зоны Шпицбергена.

Векторы течений построены на основе реанализа (<http://bulletin.mercator-ocean.fr/en/PSY4#3/75.50/-51.33>) и даны по работе [9]. Положение кромки ледяного покрова показано на дату работы в этой части акватории по данным Норвежского метеорологического института, <https://cryo.met.no>. Батиметрическая основа по GEBCO, <https://www.gebco.net>.

порядка нескольких сотен $\text{мкгCH}_4 \times \text{м}^{-2} \times \text{ч}^{-1}$ в акватории Байдацкой губы, достигающая локально единиц $\text{мг} \times \text{м}^{-2} \times \text{ч}^{-1}$ за счет всплытия газовых пузырьков на Приамальском шельфе в результате флюидной разгрузки метана из донных осадков. Наибольшие концентрации метана

в водной толще и осадках определялись в Байдацкой губе и Печорском море. В этом районе концентрация метана в атмосфере приводного слоя достигала 2118 ppb. Фоновые значения концентрации метана превышали 2018 ppb согласно непрерывным минутным измерениям двумя га-

зоанализаторами: Picarro G2132-I [4] на высоте 19 м над урезом воды и Picarro G4301 [10] — 9 м над урезом воды. Фиксировался устойчивый сток углекислого газа из атмосферы на водную поверхность повсеместно в пределах изученного региона в диапазоне от 15 до 160 мг $\text{CO}_2 \times \text{м}^{-2} \times \text{ч}^{-1}$.

Впервые детально изучена структура Западно-Новоземельского течения на границе Баренцева и Карского морей; оценены вертикальные и латеральные потоки вещества в этом течении, осуществляющем перенос теплой воды североатлантического происхождения в направлении Карского моря со скоростью, достигающей 70 см/с. Выявлено слияние двух ветвей течения вблизи северной оконечности архипелага Новая Земля.

Выполнена подробная гидрологическая съемка в центральной части Баренцева моря на меридиональном разрезе вдоль 39° в.д. — аналоге векового стандартного разреза № 6 “Кольский меридиан” [8]. Для различных форм рельефа выявлены разные стадии конвекции в районах строжней трех основных ветвей Нордкапского течения и Мурманского прибрежного течения.

Рассчитан зимний запас биогенных элементов в фотическом слое. Определены биогенные элементы, которые будут лимитировать первичную продукцию в весенний период — это, в первую очередь, минеральные формы азота в Байдарацкой губе и растворенный кремний в Баренцевом море. Определены локальные источники образования нефтяной пленки на поверхности воды Баренцева моря. Показано концентрирование углеводородов во льду и подледной воде преимущественно во взвеси.

В районах разгрузки метансодержащих флюидов собрана богатая коллекция донной фауны (10 типов, 107 морфовидов; на данный момент выполнено 43 определения до вида), содержащая, в том числе, две крупные группы седентарных животных — брахиопод (Brachiopoda) и мшанок (Bryozoa). Мшанки представлены широко и насчитывают 22 вида. До сих пор в литературе отсутствует информация о реакции мшанок на поступление метана из осадков. Детально изучается состав и закономерности распределения мейофауны в целях выявления видов-индикаторов метановой разгрузки. Получена первая информация о бионакопительном потенциале (тяжелые металлы, редкоземельные элементы) донной фауны в этих районах.

Получено пять разрезов отложений, перспективных для детальной реконструкции процессов осадконакопления и палеоклимата за последние

10–15 тыс. лет для понимания дальнейшего развития природной среды при современном глобальном потеплении. В колонке из контуритового дреффа Южно-Новоземельского желоба на глубине 4.4 м обнаружен редкий минерал — икаит — палеомаркер среды осадконакопления и разгрузки метансодержащих флюидов. В водной толще Печорского моря зафиксированы новые акустические аномалии, образованные выделением газа из осадочной толщи. Выполнены исследования ранее известных точек газопроявления по материалам недавних геолого-геофизических и геоморфологических экспедиций ИО РАН [3]. На северо-восточном склоне плато Литке (Баренцево море) изучен покмарк диаметром ~250 м и глубиной 10–12 м, при образовании которого выброс материала произошел в северном направлении за счет взрывного выделения газа. Так, накопление и высвобождение значительных объемов метана из осадочных толщ в Арктике [7] сопровождали смену гляциальных и межгляциальных климатических событий.

Благодарности. Авторы благодарят капитана Ю.Н. Горбача, экипаж судна и всех членов экспедиции за помощь и активное участие в проведении исследований.

Источники финансирования. Рейс организован ИО РАН при поддержке Минобрнауки РФ (целевое финансирование морских экспедиционных исследований). Статья подготовлена в рамках госзадания, тема № FMWE-2024-0020. Изучение районов разгрузки метансодержащих флюидов поддержано грантом РНФ № 20-17-00157-П, <https://rscf.ru/project/20-17-00157/>.

Конфликт интересов. Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гулев С.К. Глобальные изменения климата и Мировой океан // Проблемы прогнозирования. 2023. № 6. С. 25–36.
2. Матишов Г.Г., Павлова Л.Г. Соленость в условиях океанического перигляциала в Арктических морях // Доклады РАН. 1999. Т. 367. № 1. С. 115–116.
3. Никифоров С.Л., Сорохтин Н.О., Ананьев Р.А. и др. Исследования в Баренцевом и Карском морях в 52-м рейсе НИС “Академик Николай Стрехов” // Океанология. 2022. Т. 62. № 3. С. 499–501.
4. Панкратова Н.В., Беликов И.Б., Белоусов В.А. и др. Наблюдения концентраций метана, озона, черного углерода, оксидов азота, углерода и содержания $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$ над морями российской Арктики с борта научно-исследовательского судна летом

- и осенью 2018 года // *Океанология*. 2020. Т. 60. № 5. С. 685–695.
5. Решетников М.Г. Климатическая политика в России: Наука, технологии, экономика // *Проблемы прогнозирования*. 2023. № 6. С. 6–10.
 6. Система Баренцева моря / А.П. Лисицын (отв. ред.) М.: ГЕОС, 2021. 672 с.
 7. Himmeler T., Sahy D., Martma T. et al. A 160,000-year-old history of tectonically controlled methane seepage in the Arctic // *Science Advances*. 2019. V. 5(8). 1450.
 8. Ivanov V.V., Frolov I.E., Filchuk K.V. Transformation of Atlantic water in the north-eastern Barents Sea in winter // *Arctic and Antarctic Research*. 2020. V. 66(3). P. 242–262.
 9. Ivanov V.V., Tuzov F.K. Formation of dense water dome over the Central Bank under conditions of reduced ice cover in the Barents Sea // *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. 2021. 103590.
 10. Pestunov D.A., Shamrin A.M., Shmargunov V.P., Panchenko M.V. Gas-analytic measurement complexes of Baikal atmospheric-limnological observatory // *Proc. SPIE9680. 21st Int. Symp. Atmosph. Ocean Optics: Atmosph. Physics*. 2015. <https://doi.org/10.1117/12.2205538>

93th CRUISE OF THE RESEARCH VESSEL *AKADEMIK MSTISLAV KELDYSH*: GEOSYSTEMS OF THE WESTERN EURASIAN ARCTIC SHELVES IN THE SEASON OF ACTIVE AUTUMN-WINTER CONVECTION AND POLAR NIGHT

**M. D. Kravchishina^{a,*}, A. A. Klyuvitkin^a, A. N. Novigatsky^a, A. G. Matul^a,
V. V. Ivanov^b, D. A. Pestunov^c, Y. A. Shtabkin^d, B. V. Baranov^a, S. V. Galkin^a,
A. K. Ambrosimov^a, N. V. Kozina^a, O. N. Lukianova^a, I. A. Nemirovakaya^a**

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

^b *Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

^c *V. E. Zuev Institute of Atmospheric Optics, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch, Tomsk, Russia*

^d *A. M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

* *e-mail: kravchishina@ocean.ru*

Multidisciplinary studies of “sediments–water column–atmospheric layer near sea surface” system in the Barents and Pechora seas and the Baidaratskaya Bay of the Kara Sea were carried out in the expedition of “European Arctic–2023: Geological Record of Environmental and Climate Change” during the season of polar night and active development of autumn–winter thermal convection. Fundamentally new data on a number of areas of oceanology were obtained in the cruise.

Keywords: sedimentation, biogeochemistry, climate, methane, paleoceanography, Arctic