

УДК 550.47, 552.14, 550.42, 579, 574.5

АПРОБАЦИЯ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА КЛИМАТА НА ОСНОВЕ ЗАЯКОРЕННЫХ ПЛАТФОРМ, ОБСЕРВАТОРИЙ И СУДОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ В 96-М РЕЙСЕ НИС “АКАДЕМИК МСТИСЛАВ КЕЛДЫШ”

© 2025 г. М. Д. Кравчишина^{1, *}, А. А. Клювиткин¹, А. Н. Новигатский¹,
А. В. Гавриков¹, Д. А. Пестунов², Ю. А. Штабкин³, В. В. Иванов⁴,
А. С. Щука¹, А. К. Амбросимов¹, Н. В. Политова¹, И. М. Анисимов¹,
Б. В. Баранов¹, Е. А. Новичкова¹, Н. В. Козина¹, А. Г. Матуль¹, С. К. Гулев¹

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

²Институт оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия

³Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН, Москва, Россия

⁴Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

*e-mail: kravchishina@ocean.ru

Поступила в редакцию 26.12.2024 г.

После доработки 27.12.2024 г.

Принята к публикации 26.01.2025 г.

В десятой многодисциплинарной экспедиции по Программе геосистемных исследований Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН “Европейская Арктика: геологическая летопись изменений среды и климата” в Баренцево и Карское моря в июле–августе 2024 г. получены новые данные об атлантификации и эмиссии метана на Западно-Арктическом шельфе Евразии. Исследования направлены на развитие национальной системы мониторинга климатических изменений и климатически активных веществ на основе использования заякоренных автономных платформ, обсерваторий, а также судовых наблюдений.

Ключевые слова: седиментация, климат, потоки вещества, климатически активные вещества, метан, палеоокеанология, национальная система мониторинга, Арктика

DOI: 10.31857/S0030157425030129, EDN: GXEULH

96-й рейс научно-исследовательского судна “Академик Мстислав Келдыш” (25.07–31.08.2024) стал десятой экспедицией по программе Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН (ИО РАН) “Европейская Арктика: геологическая летопись изменений среды и климата”. Фундаментальная задача экспедиций, инициированных академиком А.П. Лисицыным в 2015 г., – исследование осадкообразования в Европейском секторе Арктики, что позволит понять изменения климата в северном полушарии за последние 15–20 тыс. лет и изучить наблюдаемые сегодня климатические перемены в Северном Ледовитом океане и Европе. Обоснование ведущей роли океана в изменениях климата Земли на десятилетнем масштабе времени [5] дает возможность прогноза глобального и регионального климата

в ближайшем будущем на основе исследования внутренней изменчивости океана в зависимости от синоптической и мезомасштабной динамики вод. Следовательно, для прогноза климатических изменений в Арктике необходима организация долговременного мониторинга термодинамических и биогеохимических характеристик океана [1], в первую очередь, в Европейской Арктике – ключевом регионе климатической системы северного полушария [7], включая северную часть Баренцева моря – горячую точку глобального потепления [8]. Моря Европейской Арктики имеют непосредственную связь с Северной Атлантикой и Арктическим (Полярным) бассейном, где взаимодействуют воды атлантического и арктического происхождения. Процессы водообмена в этом регионе определяют климат и условия окружаю-

шей среды не только в “арктическом средиземноморье”, но и в западной части Евразии.

Многодисциплинарное исследование системы “донные осадки—водная толща—приводный слой атмосферы” было главной задачей экспедиции и имело три направления работ: 1) апробация методики работы заякоренной автономной гидрометеорологической платформы (метеобуй) “Sea—Air—Wave Station” (SAWS), разработанной в ИО РАН [10]; 2) три постановки модернизированных автоматических глубоководных седиментационных обсерваторий (АГОС), разработанных в ИО РАН; 3) судовые наблюдения — 183 комплексные станции и 5377 морских миль непрерывных наблюдений по маршруту судна (рис. 1). В работах участвовали 67 специалистов, аспирантов и студентов из ИО РАН, Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Института геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, ФИЦ “Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН”, Геологиче-

ского института РАН, Географического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова и Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии.

Исследования проводились в северной части Баренцева моря от 76°42' с.ш. вплоть до 82°09' с.ш. на южной периферии котловины Нансена, на шельфе Северного Шпицбергена, в Карском и Печорском морях. Для изучения климатически активных веществ (парниковые газы, атмосферный аэрозоль и черный углерод) на борту судна непрерывно работали аэрозольная станция и газоаналитический комплекс. Работы на разрезах, пересекающих краевые шельфовые желоба-троги Франц-Виктория, Квитойя, Святой Анны и Воронина, а также северный континентальный склон и Восточно-Баренцевоморскую впадину выполнялись для изучения сезонных особенностей распространения и характеристик воды атлантического происхождения (АВ), ее взаимодействия с арктической водой и транс-

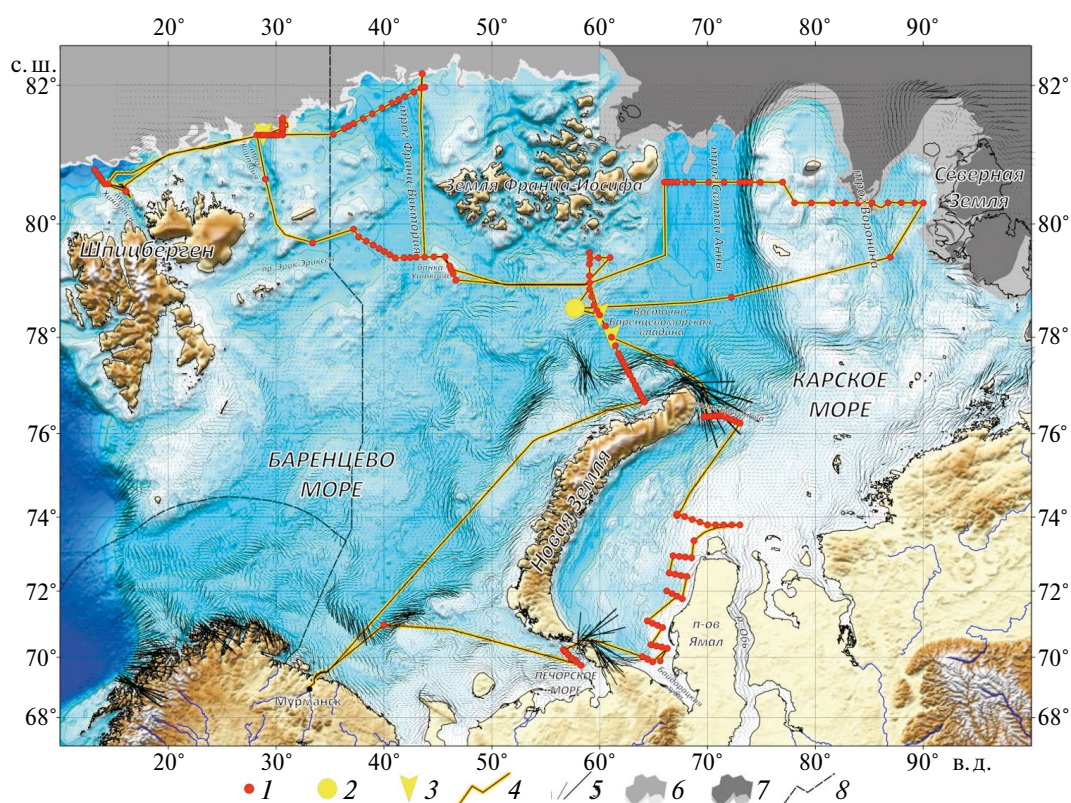


Рис. 1. Карта маршрута экспедиции и океанологических станций в июле–августе 2024 г.: 1 — комплексные станции, 2 — SAWS, 3 — АГОС, 4 — маршрут судна, 5 — векторы течений (длина вектора отражает скорость течения), 6 — ледяной покров 05 августа, 7 — ледяной покров 15 августа, 8 — границы Российской и Норвежской экономических зон и рыбоохранной зоны вокруг Шпицбергена. Векторы течений построены по [6] на основе реанализа, <http://bulletin.mercator-ocean.fr/en/PSY4#3/75.50/-51.33>. Ледяной покров показан по данным Норвежского метеорологического института, <https://cryo.met.no>. Батиметрическая основа по GEBCO, <https://www.gebco.net>.

формацию по пути распространения в восточном направлении. Температура фрамовской ветви АВ была на $\sim 2^\circ\text{C}$ выше летней среднеклиматической и соответствовала таковой для позднеосеннего сезона [6]. Проводится изучение влияния АВ на процессы седиментации и климатические события переходного периода от позднего плейстоцена к голоцену на севере Баренцева и Карского морей по данным анализа новых разрезов отложений, полученных в ключевых точках краевых шельфовых желобов-трогов.

Проведено испытание SAWS в северо-восточной части Баренцева моря в точке с координатами $78^\circ 32.8'$ с. ш. и $57^\circ 41.0'$ в. д. и глубиной постановки 164 м. SAWS проработала в автоматическом режиме мониторинга метеорологических и гидрологических параметров среды, а также концентраций метана и диоксида углерода в воздухе в течение 19 сут до запланированного подъема. Апробированная в рейсе конфигурация SAWS станет основой для развития системы подобных платформ в субполярной Северной Атлантике и морях России на втором этапе (2025–2030) реализации Важнейшего инновационного проекта государственного значения (ВИП ГЗ) “Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ” [3].

Выполнены постановки АГОС на период от 3.4 до 19 сут, на севере Баренцева моря для изучения сезонных потоков осадочного вещества и условий среды под влиянием фрамовской ветви АВ с помощью седиментационных ловушек, измерителей течений и регистраторов параметров водной толщи (температуры, солености, мутности и др.). АГОС, установленные в Восточно-Баренцевоморской впадине, позволили изучить условия седиментации под влиянием глубинного теплого течения желоба Святой Анны, поступающего из Полярного бассейна; АГОС в трог Квитойя — под влиянием подповерхностной АВ, поступающей на северо-западный шельф Баренцева моря. Годовые постановки АГОС станут важным компонентом национальной системы мониторинга на втором этапе реализации ВИП ГЗ.

Учитывая высокий нефтегазовый потенциал региона, шельф может быть источником естественной эмиссии метана в атмосферу. При этом холодные воды арктических морей являются мощным поглотителем диоксида углерода из атмосферы. Установлена положительная связь между концентрацией метана в приводном воздухе и температурным профилем воздушной мас-

сы, что позволило выявить поступление насыщенного метаном относительно теплого воздуха с материка. На банке Ушакова, в трог Хинлопен (шельф Северного Шпицбергена), Печорском море и Приамальской части Южно-Карского шельфа исследовались районы разгрузки метаносодержащих флюидов.

Изучен район холодных метановых сипов на $80^\circ 30'$ с. ш. на глубинах ~ 500 м в трог Хинлопен. С помощью видеомодуля [4] установлены бактериальные маты на поверхности дна, а в водной толще наблюдались “газовые факелы” до ~ 100 м высотой. Однако на границе вода—воздух признаки эмиссии метана не фиксировались. Повышение концентрации метана (более 2020 ppb) в приводном слое атмосферы региона связаны с поступлением воздушных масс со стороны Скандинавии.

Следствием деградации субаквальной мерзлоты и струйной дегазации углеводородов над нефтегазовыми залежами стали многочисленные бугры пучения (пинго-подобные формы рельефа) в Печорском море [2] — наименее изученные проявления дегазации в рельефе морей. Колонками вскрыты газонасыщенные осадки с тонкими шлирами льда бугра пучения диаметром 160–170 м.

На Приамальском шельфе на $71^\circ 51'$ с. ш. впервые обнаружено поле холодных метановых сипов на глубине ~ 50 м с бактериальными матами на поверхности осадка. Потоки метана на границе вода—воздух превышали $200 \text{ мкг } \text{CH}_4 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$, что указывает на локальную эмиссию метана в атмосферу. Концентрация метана в приводном воздухе Приамальского шельфа на высоте 19 м над урезом воды достигала 2257 ppb. Причиной эмиссии являются малые глубины шельфа и деградация субаквальных многолетнемерзлых пород [9], начавшаяся ~ 19 тыс. лет назад и, вероятно, активизировавшаяся в настоящее время — в период беспрецедентной скорости глобального потепления.

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

Источники финансирования. Рейс поддержан Минобрнауки РФ. Работа выполнена по госзаданию в рамках темы НИР № FMWE-2024-0020. Отдельные исследования поддержаны Российским научным фондом, гранты № 20-17-00157-П, <https://rscf.ru/project/20-17-00157/> (изучение раз-

грузки метаносодержащих флюидов); 23-77-30001, <https://rscf.ru/project/23-77-30001/> (работы с помощью заякоренных автоматических платформ и обсерваторий); 24-17-00044, <https://rscf.ru/project/24-17-00044/> (изучение изменений палеосреды).

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гulev C.K. Глобальные изменения климата и Мировой океан // Проблемы прогнозирования. 2023. № 6. С. 25–36.
2. Мельников В.П., Спесивцев В.И., Куликов В.Н. О струйной дегазации углеводородов как источнике новообразований льда на шельфе Печорского моря // Итоги фундаментальных исследований криосферы Земли / Е.С. Мельников (отв. ред.). Новосибирск: Наука. Сибирское Предприятие РАН, 1997. С. 259–269.
3. Решетников М.Г. Климатическая политика в России: Наука, технологии, экономика // Проблемы прогнозирования. 2023. № 6. С. 6–10.
4. Римский-Корсаков Н.А., Флинт М.В., Поярко С.Г. и др. Развитие технологии комплексных инструментальных подводных наблюдений применительно к экосистемам Российской Арктики // Океанология. 2019. Т. 59. № 4. С. 679–683.
5. Gulev S., Latif M. The origins of a climate oscillation // Nature. 2015. V. 521. P. 428–430.
6. 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. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2021.103590>
7. Koppers A.A.P., Coggon R. eds. Exploring Earth by Scientific Ocean Drilling: 2050 Science Framework. 2020. 124 p. <https://doi.org/10.6075/J0W66J9H>
8. Lind S., Ingvaldsen R.B., Furevik T. Arctic warming hotspot in the northern Barents Sea linked to declining sea-ice import // Nature Climate Change. 2018. V. 8. № 7. P. 634–639.
9. Semenov P., Portnov A., Krylov A. et al. Geochemical evidence for seabed fluid flow linked to the subsea permafrost outer border in the South Kara Sea // Geochemistry. Chemie Der Erde. 2020. V. 80. № 3. DOI: 10.1016/j.chemer.2019.04.005.
10. Sharmar V.D., Tereschenkov V.P., Gavrikov A.V. et al. Moored meteorological buoy as part of national greenhouse monitoring system in the Barents Sea // Oceanology. 2025. V. 65. № 1. P. 161–166.

APPROBATION OF A CLIMATE MONITORING SYSTEM BASED ON MOORED PLATFORMS, OBSERVATORIES AND SHIPBOARD STUDIES IN THE 96TH CRUISE OF THE RESEARCH VESSEL “AKADEMIK MSTISLAV KELDYSH”

M. D. Kravchishina^{a, *}, A. A. Klyuvitkin^a, A. N. Novigatsky^a, A. V. Gavrikov^a,
D. A. Pestunov^b, Yu. A. Shtabkin^c, V. V. Ivanov^d, A. S. Schuka^a, A. K. Ambrosimov^a,
N. V. Politova^a, I. M. Anisimov^a, B. V. Baranov^a, E. A. Novichkova^a, N. V. Kozina^a,
A. G. Matul^a, S. K. Gulev^a

^aShirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

^bV. E. Zuev Institute of Atmospheric Optics, Russian Academy of Science, Siberian Branch, Tomsk, Russia

^cA. M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

^dLomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

*e-mail: kravchishina@ocean.ru

In the tenth multidisciplinary expedition under the geosystems research program of the Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences “European Arctic: Geological Record of Environmental and Climate Change” to the Barents and Kara seas in July–August 2024, new data on atlantification and methane emission were obtained on the Eurasian Western Arctic Shelf. The research is aimed at developing a National system for monitoring climate change and climate-active substances based on the use of moored autonomous platforms, observatories, and vessel based observations.

Keywords: sedimentation, biogeochemistry, climate, climate-active substances, methane, climatostratigraphy, paleoceanography, Arctic