

УДК 550.47,552.14,550.42,579,574.5

89-й РЕЙС (1-й ЭТАП) НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО СУДНА “АКАДЕМИК МСТИСЛАВ КЕЛДЫШ”: КЛИМАТИЧЕСКИЙ ЭКСПЕРИМЕНТ ВО ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С САМОЛЕТОМ-ЛАБОРАТОРИЕЙ ТУ-134 “ОПТИК” В КАРСКОМ МОРЕ

© 2023 г. М. Д. Кравчишина¹, *, А. А. Клювиткин¹, А. Н. Новигатский¹,
Д. И. Глухолец¹, В. П. Шевченко¹, Б. Д. Белан²

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

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

*e-mail: kravchishina@ocean.ru

Поступила в редакцию 01.02.2023 г.

После доработки 01.02.2023 г.

Принята к публикации 16.02.2023 г.

Проведен уникальный климатический эксперимент по исследованию состава воздуха и характеристик подстилающей поверхности в Российском секторе Арктики и Сибири. Синхронизированные исследования с борта НИС “Академик Мстислав Келдыш” и уникальной научной установки (УНУ) самолета-лаборатории Ту-134 “Оптик” выполнены в южной части Карского моря. Проведена валидация авиационных и спутниковых алгоритмов расчета характеристик морской поверхности. Впервые на арктическом шельфе получены данные о концентрации метана в системе тропосфера–приводный слой атмосферы–водная толща–донные отложения. Единовременно оценены потоки парниковых газов с акватории шельфа и прилегающей суши. Проведено сопряженное изучение условий и процессов современной и древней седиментации в пределах Южно-Карского осадочного бассейна, где локализованы огромные запасы углеводородов (УВ).

Ключевые слова: метан, аэрозоли, взвесь, осадочное вещество, потоки, биогеохимия, климат, арктический шельф, летающая лаборатория, климатический эксперимент

DOI: 10.31857/S0030157423030073, **EDN:** QDEIWX

Процессы осадконакопления и преобразования органического вещества (ОВ) в Арктике тесно связаны с изменением климата на Земле и с формированием полезных ископаемых [4]. Важная особенность Карского моря – это скопление крупных залежей УВ в его южной части [2] и огромный речной сток, содержащий метан в составе растворенных газов [3]. В морских нефтегазоносных провинциях шельфа наблюдается активная дегазация недр – высота “газовых труб” достигает нескольких километров [6]. На суше такие явления пока не отмечены. Флюиды УВ мигрируют к поверхности морского дна в течение длительных периодов геологического времени, но потоки этих флюидов остаются недооцененными в балансовых расчетах потоков парниковых газов [10]. Среди парниковых газов наибольший вклад в тепловой баланс Земли вносят диоксид углерода и метан. Выявление причинно-следственных связей изменения климата и возрастания антропогенной нагрузки на морские акватории Крайнего Севера России должно быть реализовано при междисциплинарных исследованиях

не только на шельфе, но и на прилегающей суше. Ранее эксперимент по измерению состава тропосферы в Российском секторе Арктики с борта самолета-лаборатории был выполнен в сентябре 2020 г. [8], но он не сопровождался морскими исследованиями.

89-й рейс (1-й этап) НИС “Академик Мстислав Келдыш” во взаимодействии с самолетом-лабораторией Ту-134 “Оптик” выполнялся в пределах Южно-Карского осадочного бассейна с 5 по 18 сентября 2022 г. с попутными работами в юго-восточной части Баренцева моря по маршруту следования судна в порт г. Мурманск (рисунок 1). Проведено сопряженное изучение условий и процессов современного и древнего осадкообразования в южной части Карского моря с оценкой потоков вещества, парниковых газов и загрязнений. Научный коллектив, объединенный общей задачей на борту судна, включал 60 специалистов из 9 институтов РАН и вузов: ИО РАН, ИОА СО РАН, ГЕОХИ РАН, ФИЦ Биотехнологии РАН, МФТИ, МГУ имени М.В. Ломоносова, ФИЦ МГИ РАН, ФИЦ ИнБЮМ РАН и СПбГУ.

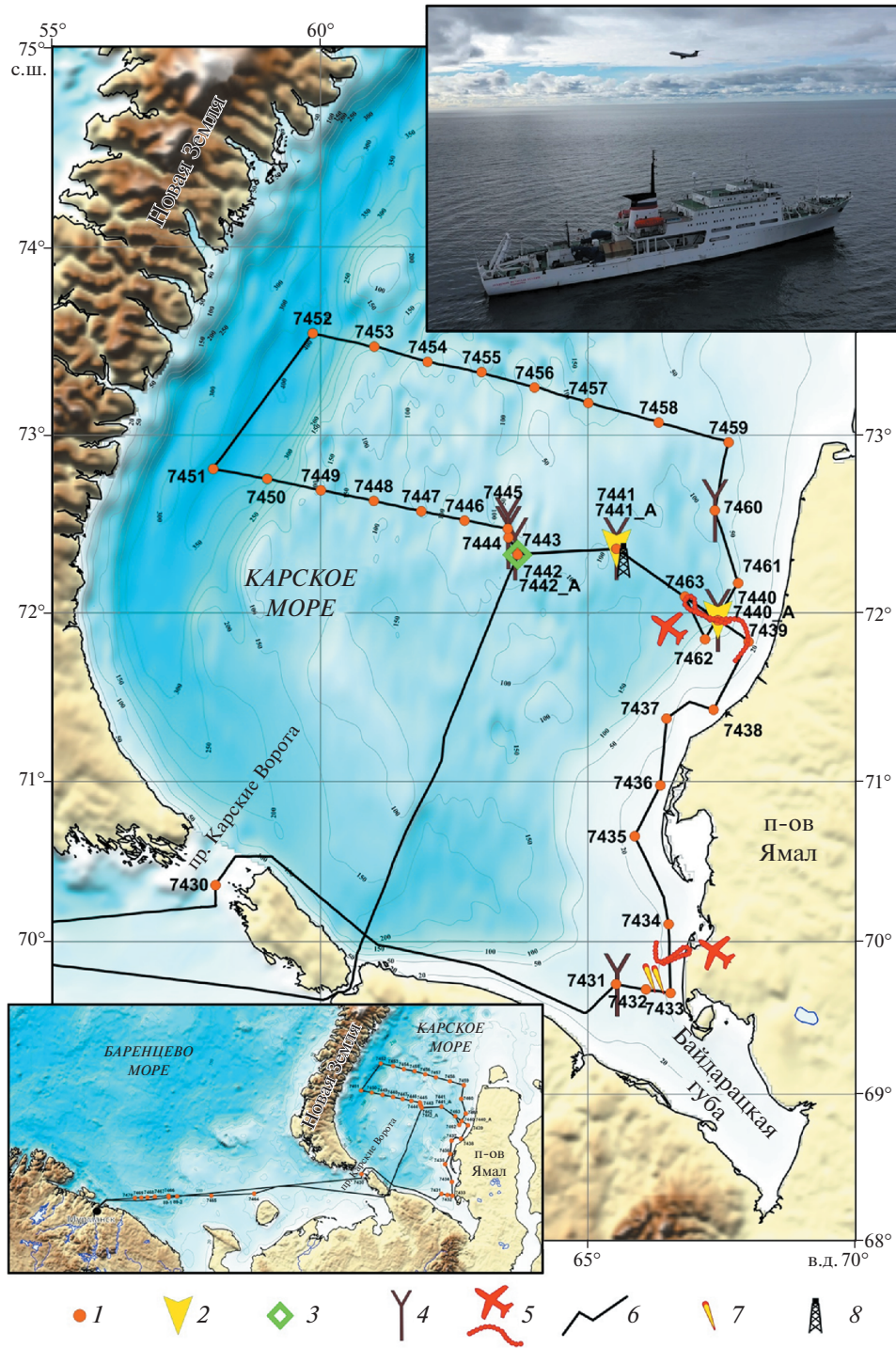


Рис. 1. Карта морских экспедиционных исследований в южной части Карского моря, 08–15 сентября 2022 г.: 1 – комплексные станции (комплекс оптических, гидрооптических, гидрологических, гидрохимических, гидробиологических, микробиологических, седиментологических измерений и литолого-геохимических работ по отбору верхнего ненарушенного слоя осадков с помощью мультикорера); 2 – комплексные станции с постановкой и подъемом автоматических глубоководных седиментационных обсерваторий; 3 – буйковая станция с инклинометрическими измерителями; 4 – комплексные станции с отбором длинных колонок осадков с помощью ударной геологической трубки большого диаметра; 5 – полигоны непосредственных подсамолетных измерений с траекторией полета Ту-134 “Оптик”; 6 – маршрут судна с непрерывными попутными измерениями (газохимическими, оптическими и гидрооптическими); 7 – “газовые факелы” по данным эхолотного профилирования; 8 – Ленинградское газоконденсатное месторождение. Батиметрическая основа моря заимствована из работы [5]. На врезке внизу показан весь маршрут судна; на врезке сверху – фото синхронных работ с борта НИС “Академик Мстислав Келдыш” и самолета-лаборатории Ту-134 “Оптик”.

Климатический эксперимент представлял собой комплекс измерений *in situ* в водной толще и приводном слое атмосферы непрерывно по всему маршруту судна (2275.4 морских миль) и работы на 44-х океанологических станциях с привлечением самолета-лаборатории и спутниковой информации о биооптических характеристиках поверхностного слоя морской воды. Непосредственные полеты самолета над судном на высоте ~90–200 м от поверхности моря состоялись 9 и 10 сентября 2022 г. для валидации авиационных алгоритмов расчета характеристик подстилающей поверхности (взвеси, хлорофилла, растворенного ОВ и др.) и измерения состава воздуха и аэрозолей в атмосфере и тропосфере над морем.

Выполнен комплекс гидрооптических измерений и непрерывное лидарное зондирование верхнего слоя воды. Впервые получены данные о концентрациях метана в системе тропосфера–приводный слой атмосферы–водная толща–донные отложения с единовременной оценкой его потоков из Васюганских болот, термокарстовых озер и других ландшафтов Западной Сибири. Изучены скорости микробных процессов цикла углерода и серы в воде и осадках, а также филогенетический состав микробных сообществ осадков. Выполнены изотопно-геохимические исследования УВ газов в осадках для восстановления природы глубинных газовых флюидов. Изучена роль природных источников в эмиссии метана на шельфе: микропросачивание (диффузная дегазация осадочной толщи над нефтегазовыми бассейнами), струйно-пузырьковые выходы метаносодержащих растворов и газов на дне (холодные метановые сипы) и деградация субаквальных многолетнемерзлых пород (ММП), начавшаяся в этом регионе ~18 тыс. лет назад [7].

На Приямальском шельфе глубиной 13–32 м повсеместно обнаружены признаки слабой, но устойчивой диффузии метана из осадков. Реликтовые ММП, сохранившиеся на прибрежных участках шельфа, нестабильны, деградируют и не выполняют роль газонепроницаемого слоя [1, 9]. Повышенные концентрации метана (до 2.09 ppm) в приводной атмосфере фиксировались локально: над участком дна ~2 км протяженностью, где в водной толще зарегистрированы акустические аномалии – “газовые факелы”. При этом в тропосфере над шельфом Западного Ямала концентрации метана не превышали фоновых значений (≤ 1.98 ppm).

Выполнены исследования седиментационной системы южной части Карского моря: атмосферные аэрозоли–водная взвесь–наилкок–донные осадки, включая изучение гидрохимических и гидрологических условий. Изучены потоки осадочного вещества с помощью 2-х автоматических глубоководных седиментационных обсерваторий

на Приямальском шельфе. Исследован состав УВ в осадках, взвеси и микрослое на границе морская вода–атмосфера. Опробовано осадочное тело на Западно-Карской ступени, содержащее разуплотненные газонасыщенные горизонты в основании вскрытой 6-метровой толщи. Отобраны газонасыщенные илы и алевриты Байдарацкой губы и Приямальского шельфа. Исследование микрофоссилий в осадках наряду с изучением литологических и изотопно-геохимических маркеров палеосреды позволяет реконструировать палеоклимат для моделирования климатических изменений в настоящем и будущем.

Таким образом, впервые в рамках проекта Минобрнауки РФ на проведение масштабных научных проектов мирового уровня с использованием УНУ реализован климатический эксперимент по изучению изменения состава воздуха и характеристик подстилающей поверхности в Российском секторе Арктики и Сибири с синхронными исследованиями с научно-исследовательского судна и с борта самолета-лаборатории.

Благодарности. Авторы благодарят чл.-корр. РАН А.В. Сокова и академика М.В. Флинта за всемерную поддержку в реализации климатического эксперимента, А.И. Скорохода за помощь в организации геохимических измерений в атмосфере, капитана Ю.Н. Горбача и экипаж НИС “Академик Мстислав Келдыш”, а также всех членов экспедиции за помощь и активное участие в проведении исследований.

Источники финансирования. Рейс организован ИО РАН при поддержке госбюджета – целевое финансирование морских экспедиций Минобрнауки РФ. Работы выполнялись в рамках проекта Минобрнауки РФ “Исследование антропогенных и естественных факторов... с использованием УНУ “Самолет-лаборатория Ту-134 “Оптик”” (соглашение № 075-15-2021-934 от 28.09.2021 г.). Исследования частично проводились в рамках госзадания, тема № FMWE-2021-0006.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дзюбло А.Д., Алексеева К.В. Геокриологические условия мелководного шельфа Карского моря // *Neftegaz.ru*. Деловой журнал. 2020. № 5 (101). С. 75–81.
2. Конторович В.А., Конторович А.Э. Геологическое строение и перспективы нефтегазоносности шельфа Карского моря // Докл. РАН. 2019. Т. 489. № 3. С. 272–276.
3. Леин А.Ю., Иванов М.В. Биогеохимический цикл метана в океане. М.: Наука, 2009. 576 с.
4. 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.

5. Мирошников А.Ю., Бадюков Д.Д., Флинт М.В. и др. Рельеф дна Карского моря и сорбционные свойства осадков как факторы аккумуляции загрязнений // *Океанология*. 2021. Т. 61. № 5. С. 809–821.
6. Сулова А.А., Коротков С.Б., Карнаухов С.М. и др. Нефтегазоносные бассейны шельфа России // *Neftegaz.ru*. Деловой журнал. 2020. № 1 (97). С. 52–64.
7. Bauch H.A., Mueller-Lupp T., Taldenkova E. et al. Chronology of the Holocene transgression at the North Siberian margin // *Global Planet. Change*. 2001. V. 31 (1–4). P. 125–139.
8. Belan B.D., Ancellet G., Andreeva I.S. et al. Integrated airborne investigation of the air composition over the Russian sector of the Arctic // *Atmos. Meas. Tech*. 2022. V. 15 (13). P. 3941–3967.
9. Portnov A., Smith A.J., Mienert J. et al. Offshore permafrost decay and massive seabed methane escape in water depths >20 m at the South Kara Sea shelf // *Geophysical Research Letters*. 2013. V. 40. P. 3962–3967.
10. Thornton B.F., Etioppe G., Schwietzke S. et al. Conflicting estimates of natural geologic methane emissions // *Elementa: Science of the Anthropocene*. 2021. V. 9 (1). 00031.

89th Cruise (1st Stage) of the Research Vessel *Akademik Mstislav Keldysh*: Climate Experiment in Interaction with the *Tu-134 Optic* Flying Laboratory

**M. D. Kravchishina^{a, #}, A. A. Klyuvitkin^a, A. N. Novigatsky^a,
D. I. Glukhovets^a, V. P. Shevchenko^a, B. D. Belan^b**

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

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

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

A unique climate experiment was carried out to study the composition of the air and the characteristics of the underlying surface in the Russian sector of the Arctic and Siberia. Synchronized research onboard the RV *Akademik Mstislav Keldysh* and the unique scientific facility (USF) flying laboratory *Tu-134 Optik* were carried out in the South Kara Sea. Validation of airborne and satellite algorithms for calculating the characteristics of the sea surface layer was carried out in the cruise. For the first time on the Arctic shelf, data were obtained on the concentration of methane in the natural system of troposphere–atmospheric surface layer–water column–bottom sediments. The fluxes of greenhouse gases were simultaneously estimated from the shelf area and adjacent land. A related research of the conditions and processes of recent and ancient sedimentation was carried out in the South Kara Sedimentary Basin, where huge hydrocarbon (HC) reserves are localized.

Keywords: methane, aerosols, particulate matter, sinking particles, fluxes, biogeochemistry, climate, Arctic shelf, flying laboratory, climate experiment