



Основные научные проблемы осадконакопления в Европейской Арктике: материалы 84^{го} рейса НИС «Академик Мстислав Келдыш»

М.Д. Кравчишина*, А.А. Клювиткин

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

* kravchishina@ocean.ru

Москва-2022



ОСНОВНЫЕ ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ЭКСПЕДИЦИИ



- Исследование осадочного вещества взаимодействующих геосфер (в приводном слое атмосферы, ледяном покрове, водной толще, гидротермальных плюмах Арктических срединных хребтов, холодных метановых сипах) и донных осадков Европейской Арктики и Полярной Атлантики с определением скоростей биогеохимических процессов и региональными палеоклиматическими реконструкциями. Знания о структуре и стабильности основных состояний палеоклимата (оледенение и межледниковье, глобальные потепления) позволяют судить о трендах развития природной среды в будущем.
- Сопряженное изучение условий и процессов современной и древней седиментации с количественной оценкой потоков вещества и загрязнений (тяжелые металлы, радионуклиды, микропластик, нефтяные углеводороды) в области контакта холодной полярной и теплой атлантической водных масс, под влиянием холодных (сиповых) и горячих (гидротермальных) флюидов для целей обоснованного прогноза климата и среды будущего.
- Детальное исследование изотопных параметров разных ветвей атлантической воды в Европейской Арктике и Полярной Атлантике в сочетании со стандартными гидролого-гидрохимическими исследованиями.
- Биооптические и газо-химические исследования морской воды и приводного слоя атмосферы; анализ межгодовой изменчивости изученных характеристик в зависимости от океанологических и гидрометеорологических условий.
- Сравнительный анализ структуры фитопланктона и уровня первичной продукции экологически разнородных районов Европейской Арктики и Полярной Атлантики для изучения влияния атлантификации на первично-продукционное звено пелагической экосистемы.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

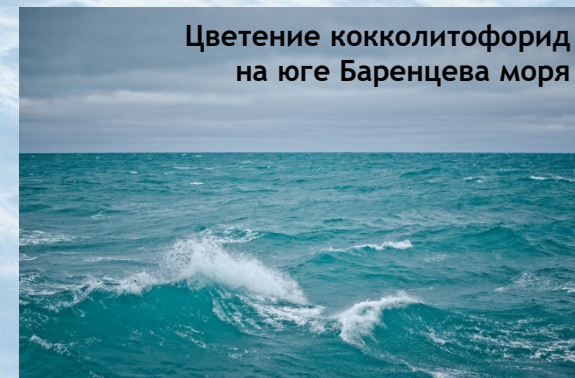
Экспедиция проведена при финансовой поддержке **Минобрнауки России** для выполнения **Государственных заданий Минобрнауки России по 14-и темам Планов НИР**, в том числе, №№ 0128-2021-0006, 0128-2021-0016, 0128-2021-0004, 0128-2021-0012 и др.

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), 21-77-20025 (оптические исследования атмосферы).

Кромка ледяного покрова на 82°04' с.ш.



Цветение кокколитофорид на юге Баренцева моря



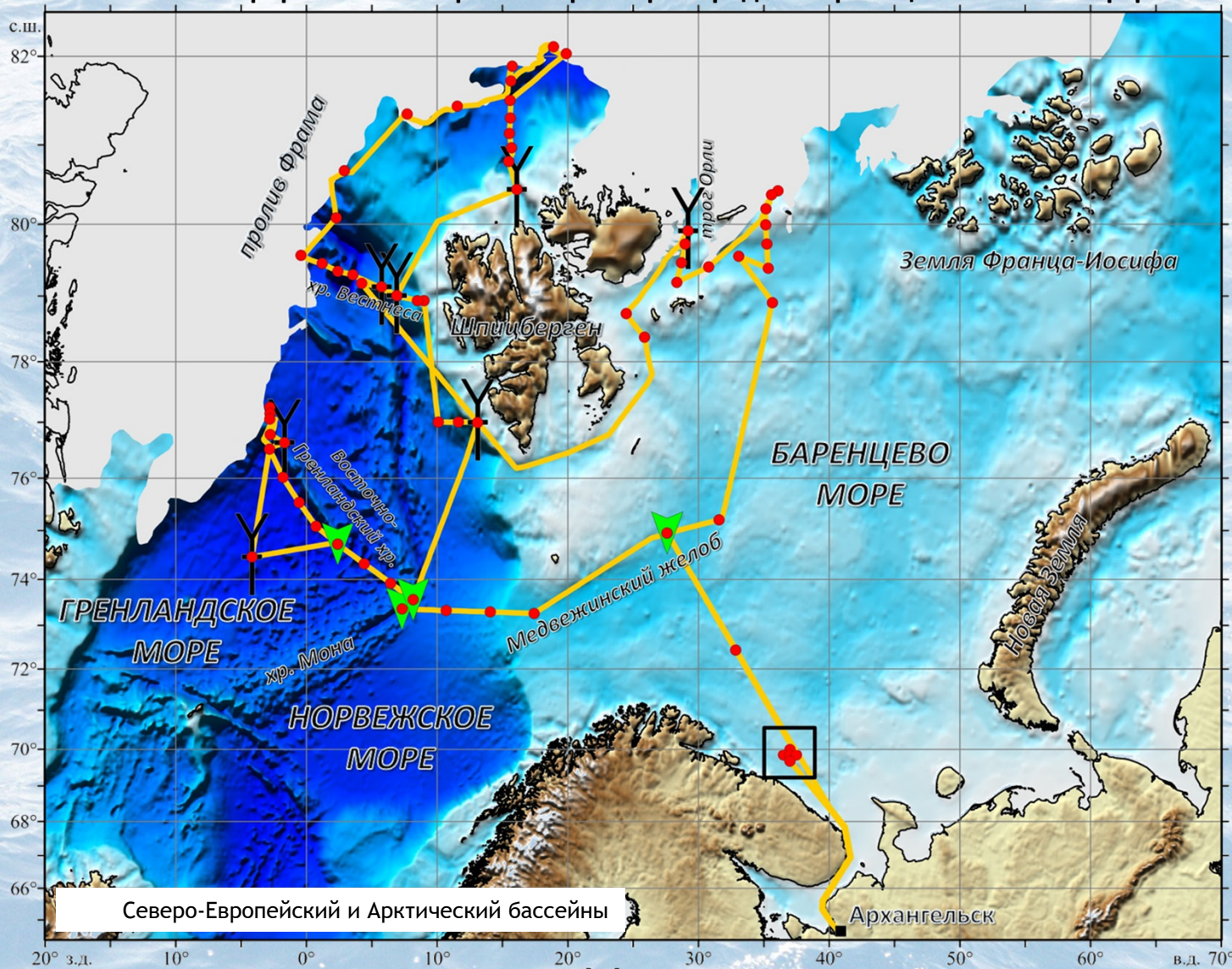


СРОКИ И МАРШРУТ ЭКСПЕДИЦИИ «Европейская Арктика–2021»

24 июля – 26 августа, 34 суток:

68 комплексных океанологических станций,

непрерывные измерения параметров среды на границе океан–атмосфера по маршруту судна



Условные обозначения:

- Комплексные станции (выполнялся весь комплекс работ)
- ▼ АГОС (автономные глубоководные седиментационные обсерватории)
- Y Отбор длинных (до 5,55 м) колонок осадков
- Путь судна
- Морской лед
- Полигон по изучению характеристик цветения кокколитофорид

Анализ ледовой обстановки на момент работы у кромки ледяного покрова выполнен по данным Норвежского метеорологического института (<https://cryo.met.no/>)





УЧАСТНИКИ ЭКСПЕДИЦИИ



- 8 отрядов (научных направлений): выполнение работ по 14-и темам госзаданий, а также проектам РНФ, РФФИ и Минобрнауки РФ.
- 33 научных сотрудника:
7 аспирантов и студентов, 12 кандидатов наук, 4 доктора наук, 1 член-корреспондент РАН и др.,
12 молодых специалистов младше 39 лет (36% от общего количества участников).
- ИО РАН + 7 сотрудничающих организаций: ИГЕМ РАН, ГЕОХИ РАН, ИОА СО РАН, ФИЦ Биотехнологии РАН, МФТИ, МГУ им. М.В. Ломоносова, ИФА РАН.



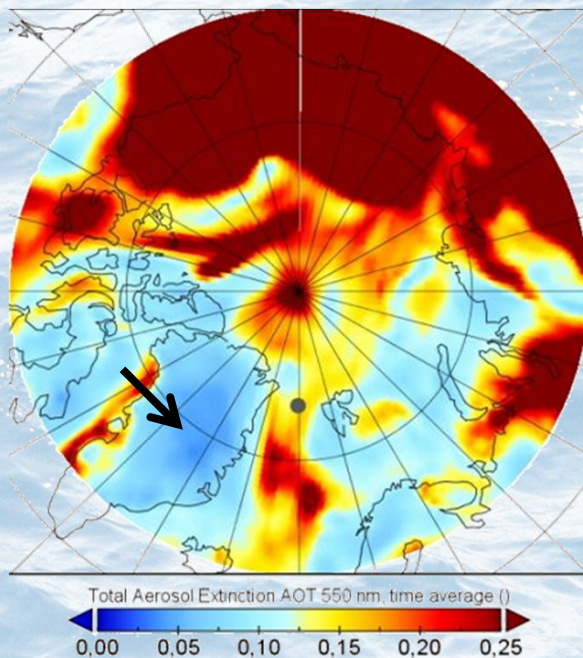
Участники экспедиции на борту НИС «Академик Мстислав Келдыш», август 2021 г.



ПРИВОДНЫЙ СЛОЙ АТМОСФЕРЫ



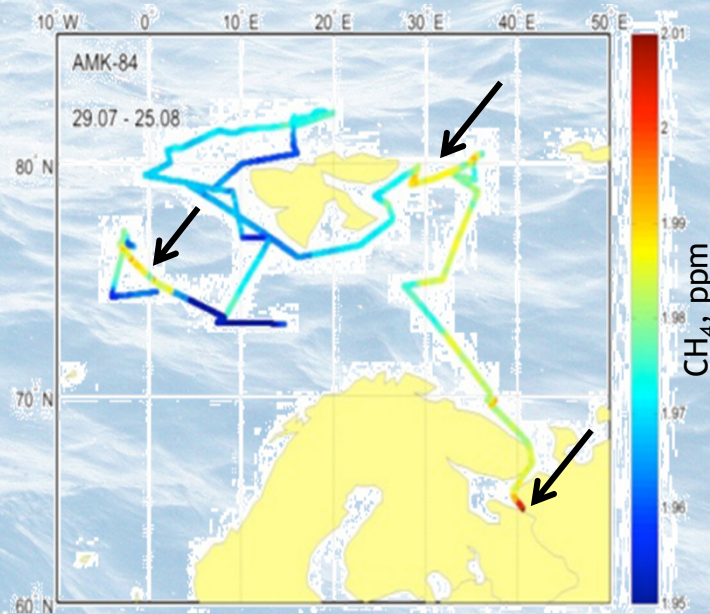
Распределение АОТ $\tau_{0,55}^a$ на основе
реанализа MERRA-2, 14.08.2021 г.
Черной точкой показано расположение судна



Получен непрерывный ряд наблюдений массовой концентрации сажи. Относительное содержание сажи в частицах аэрозоля и альbedo однократного аэрозольного рассеяния в видимой области спектра позволяет оценить роль морского аэрозоля в радиационных процессах. Эта работа ведется под руководством В.П. Шевченко (ИО РАН) и С.М. Сакерина (ИОА СО РАН).

Мониторинг содержания углекислого газа, водяного пара, метана и изотопного состава углерода метана ($\delta^{13}\text{C}(\text{CH}_4)$) в атмосфере над поверхностью океана с помощью автоматического лазерного анализатора проводится под руководством А.И. Скорохода (ИФА РАН). Концентрация метана варьировала от 1.91 до 2.01 ppm; зоны устойчивого повышения его концентрации наблюдали над акваторией Восточно-Гренландского хребта (Гренландское море) и в желобе Орли (Баренцево море).

Метан в приповерхностном слое атмосферы, судовые измерения по маршруту судна
[Скороход и др., 2021]

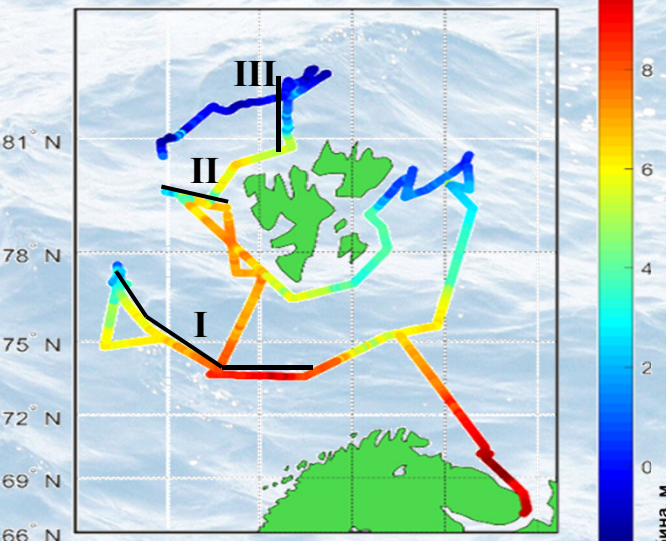




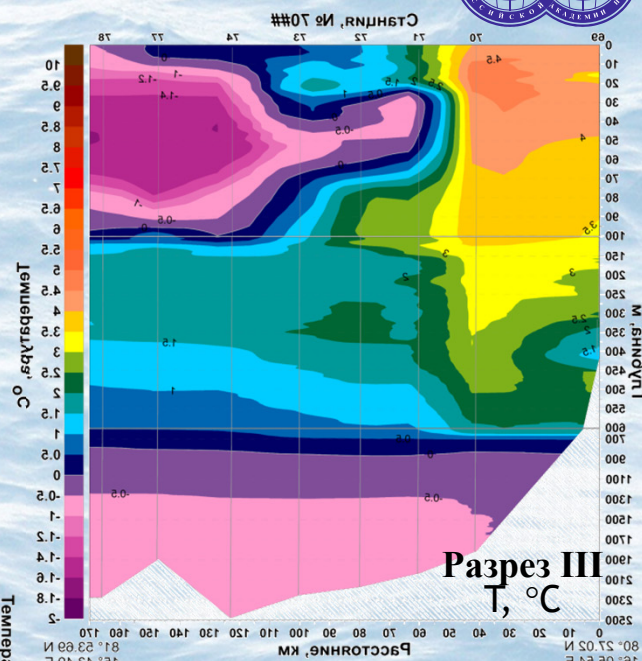
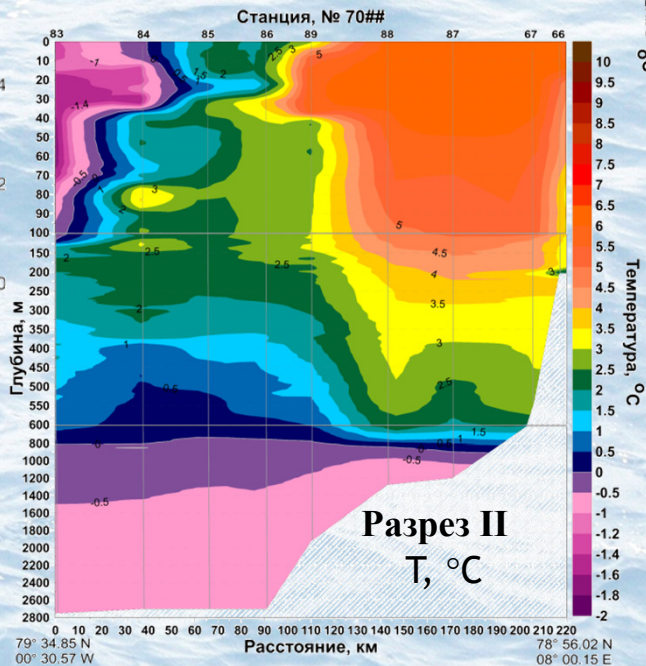
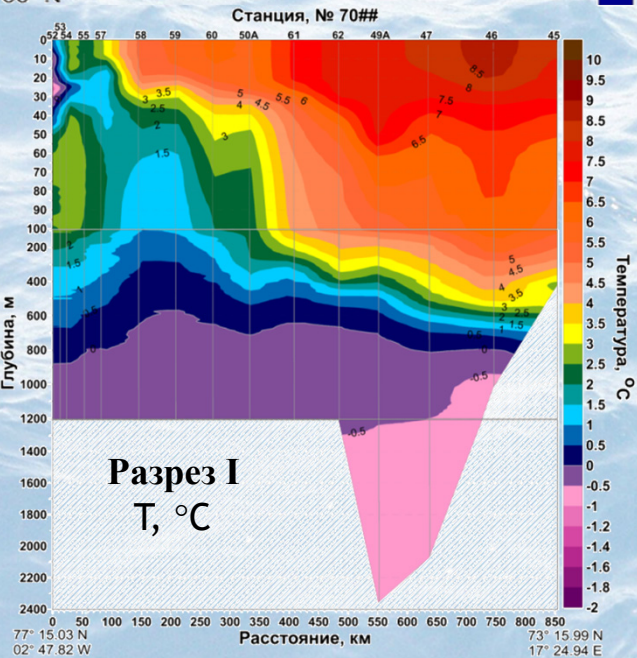
ГИДРОФИЗИЧЕСКИЕ И ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ



Температура воды
поверхностного слоя по маршруту судна,
данные проточного комплекса T, °C
3° E 13° E 23° E 33° E 43° E



Изучение поступления Атлантической
воды (АВ) в Арктику:
распределение температуры на разрезах
I, II и III



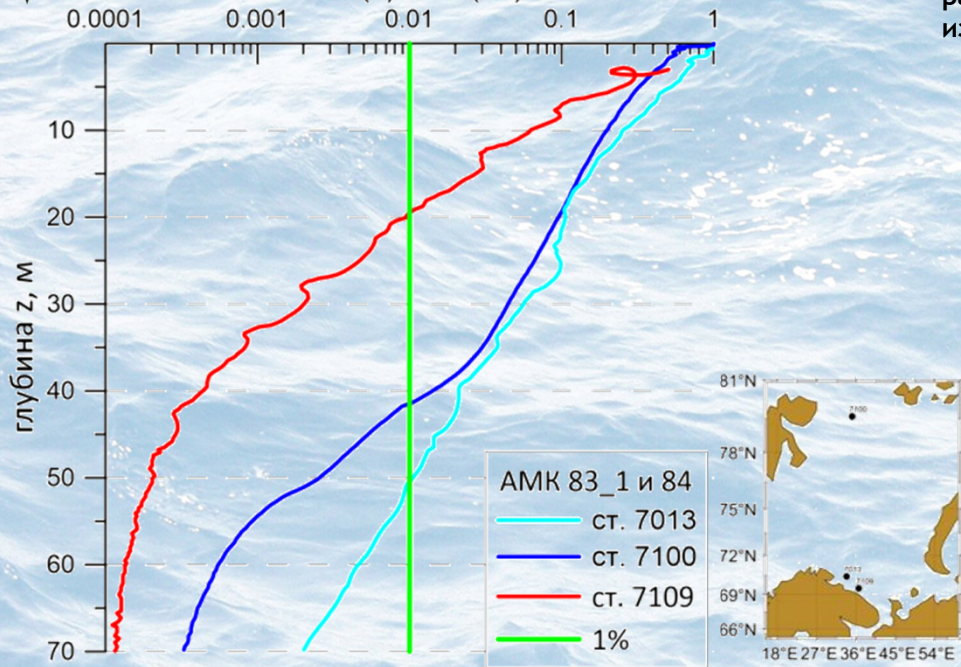
Обширные гидролого-гидрохимические исследования, выполненные в экспедиции сотрудниками ИО РАН и МФТИ, послужат основой при решении многих геохимических, биогеохимических и биологических задач, связанных с атлантификацией и потеплением в Арктике. Теплая «атлантическая» область наступает на холодную «арктическую» зону вследствие сдвига Полярного фронта на север.



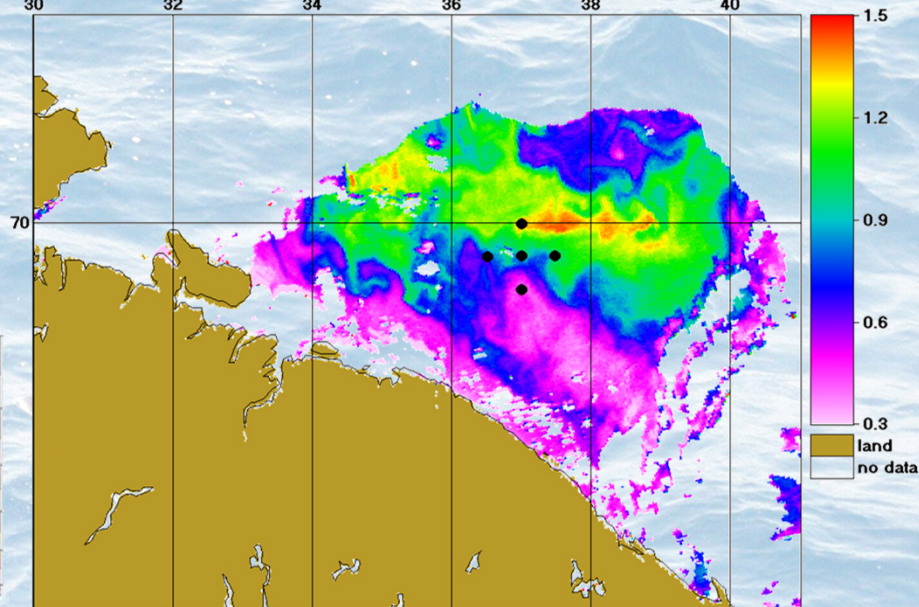
ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОДНОЙ ТОЛЩИ



Влияние цветения кокколитофорид на ФАР $\PhiАР(z)/\PhiАР(0^+)$

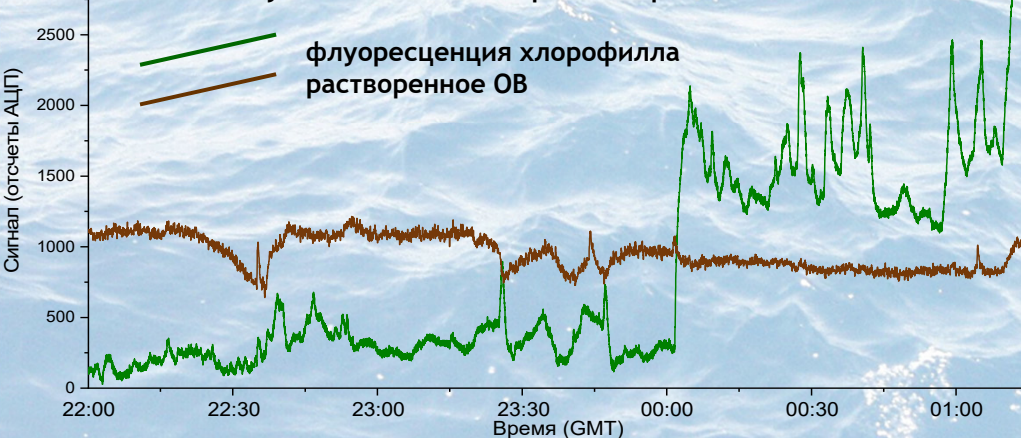


Концентрация клеток кокколитофорид 19 августа 2021 г., рассчитанная по региональному алгоритму ИО РАН на основе натуральных измерений и данных спутникового сканера цвета MODIS-Aqua



Nc00c A2021231101000.L2_LAC_OC_Nc00c.nc : 19 Aug 2021 10:13:26 - 19 Aug 2021 10:14:31

Интенсивность флуоресценции воды при прохождении фронтальной зоны 18 августа 2021 г. по материалам проточной системы



Изучены оптические характеристики морской воды и приводного слоя атмосферы. В Лаборатории оптики океана ИО РАН (Д.И. Глуховец) разработан комплексный подход к исследованию поверхностного слоя океана, сочетающий судовые контактные измерения и спутниковые наблюдения с разработкой региональных алгоритмов анализа спутниковых данных. Получены новые данные в рамках программы многолетних исследований оптических свойств воды в области цветения кокколитофорид в Баренцевом море, поскольку эти цветения могут воздействовать на климатические факторы вследствие влияния на балансы тепла и CO_2 в системе океан-атмосфера. Непрерывные измерения потока падающей на поверхность моря радиации позволят рассчитать теплосодержание деятельного слоя изученного региона.

ВЗВЕСЬ ВОДНОЙ ТОЛЩИ

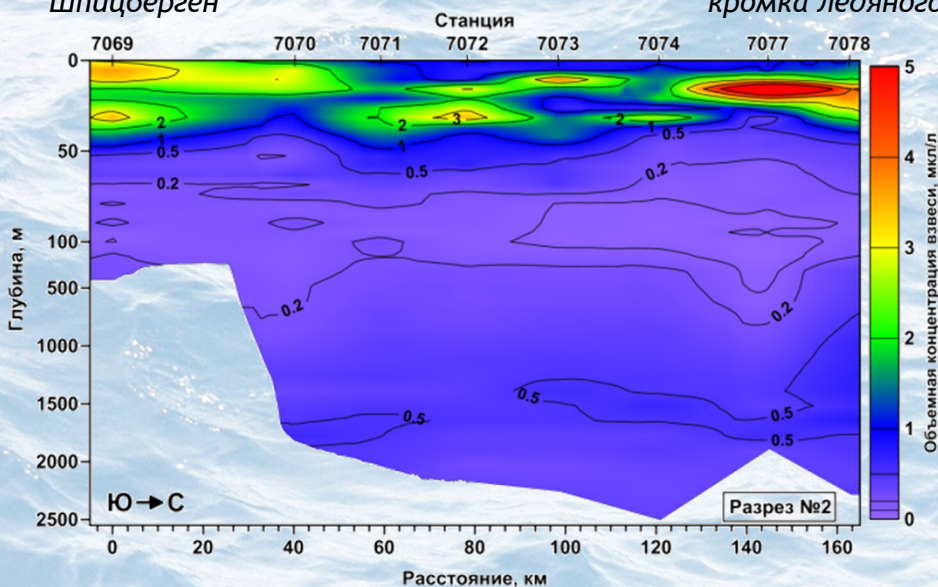
Объемная концентрация взвеси (мкл/л)
по данным лазерного дифрактометра LISST-Deer

Северный
Шпицберген

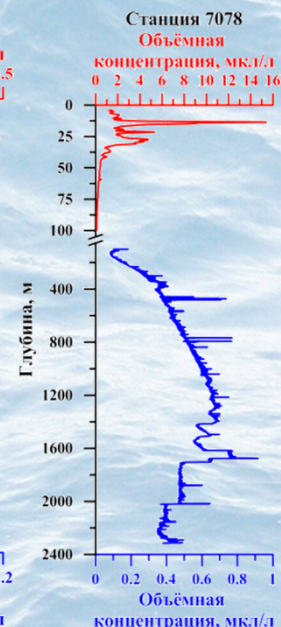
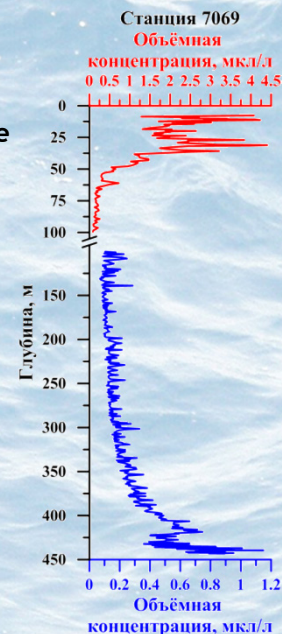
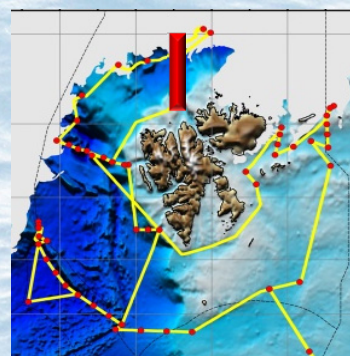
Котловина Нансена
кромка ледяного покрова

На шельфе
Шпицбергена

У кромки льда



Положение разреза на карте



Отбор проб льда



Лазерный дифрактометр LISST-Deer
в составе зондирующего комплекса



- Изучены свойства взвеси комплексом методов, внедряемых нами в практику судовых океанологических исследований.
- Выявлены особенности формирования взвесенесущих и нефелоидных слоев в разных обстановках седиментации: у кромки ледяных полей, на гидротермальных полях, метановых сипах, в трогах-желобах и др.
- Массовая концентрация взвеси: Норвежско-Гренландский бассейн 0,04-0,71 мг/л; Баренцево море 0,06-1,3 мг/л [Политова и др., 2022].

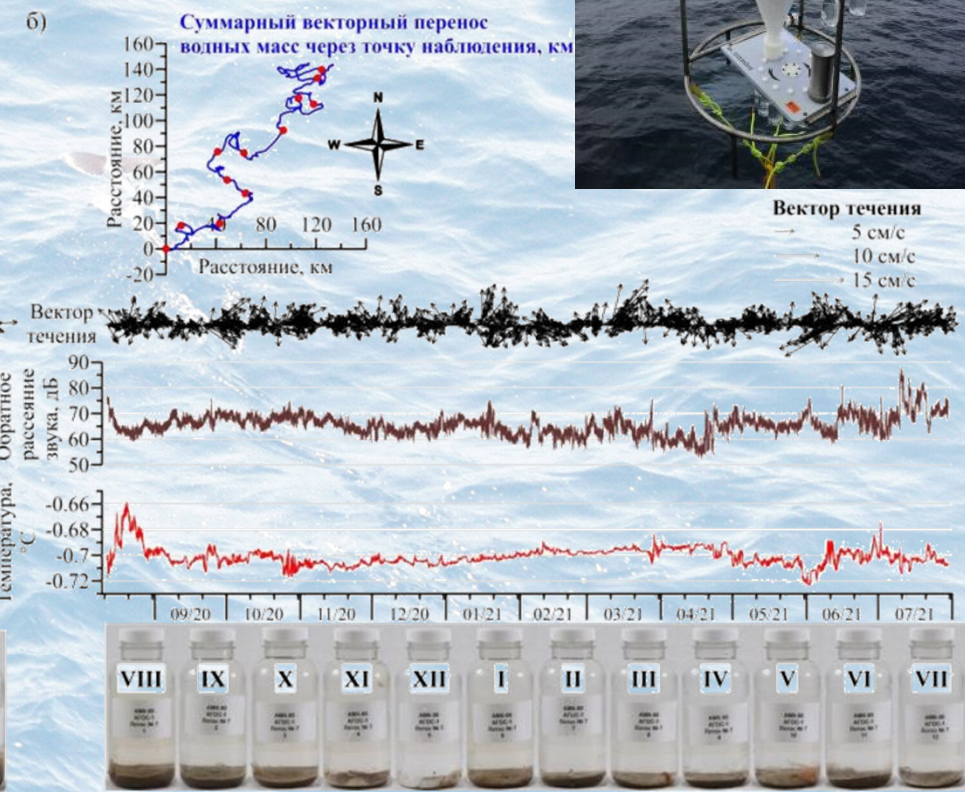
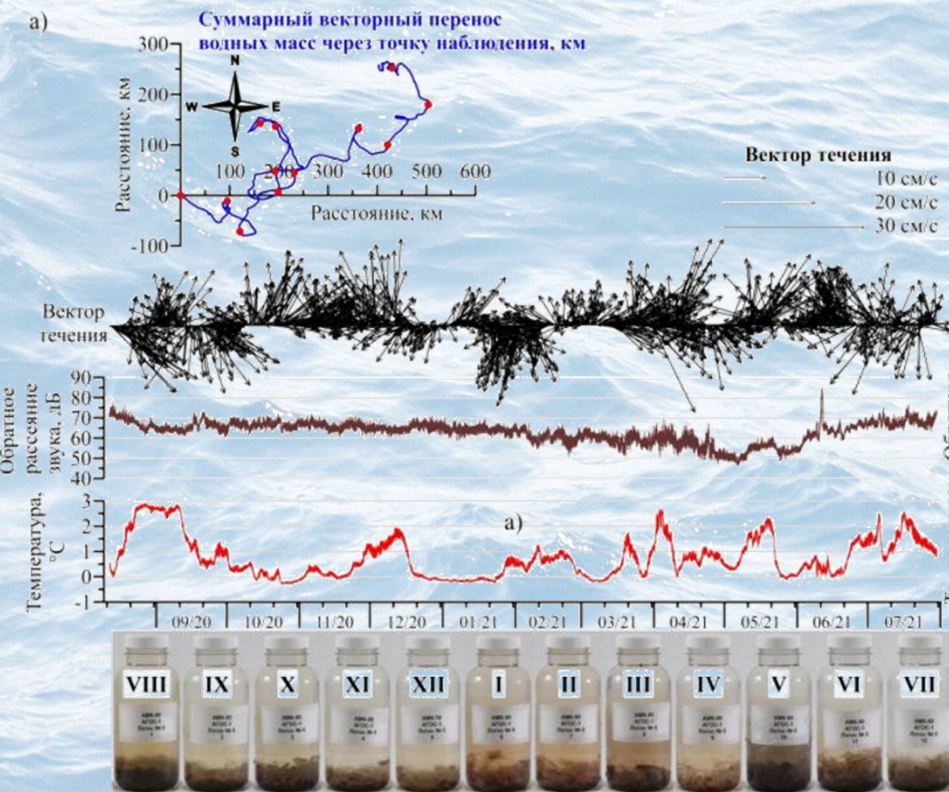
ВЕРТИКАЛЬНЫЕ ПОТОКИ ОСАДОЧНОГО ВЕЩЕСТВА ПО ДАННЫМ АВТОМАТИЧЕСКИХ ГЛУБОКОВОДНЫХ СЕДИМЕНТАЦИОННЫХ ОБСЕРВАТОРИЙ (АГОС)

Результаты работы годовой АГОС в Норвежском море на северном сегменте хребта Мона: ежемесячное распределение осадочного материала по пробосборникам в течение года и векторная сумма течений, скорость и направление течений, температура и обратное рассеяние звука взвесью



Горизонт 500 м

Горизонт 2490 м



- Высокие потоки вещества ($273 \text{ мг/м}^2/\text{сут.}$), а также мощный (до $\sim 250 \text{ м}$) нефелоидный слой согласно данным нефелометра и анализатора частиц LISST-Deer связаны с влиянием гидротермального плюма.
- Сведения о дальнем переносе вещества гидротермального плюма нейтральной плавучести от неизвестного источника [Богданов и др., 1997] подтверждаются нашими данными работы АГОС в течение года, установленной на хребте Мона.



ВЕРТИКАЛЬНЫЕ ПОТОКИ ОСАДОЧНОГО ВЕЩЕСТВА ПО ДАННЫМ АВТОМАТИЧЕСКИХ ГЛУБОКОВОДНЫХ СЕДИМЕНТАЦИОННЫХ ОБСЕРВАТОРИЙ (АГОС)



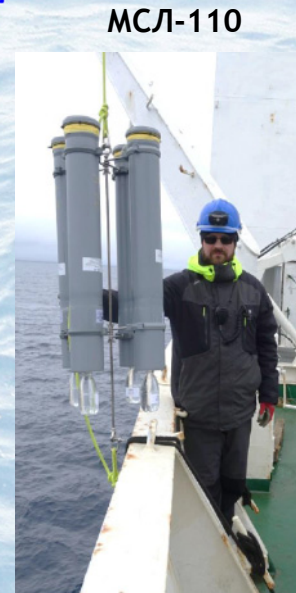
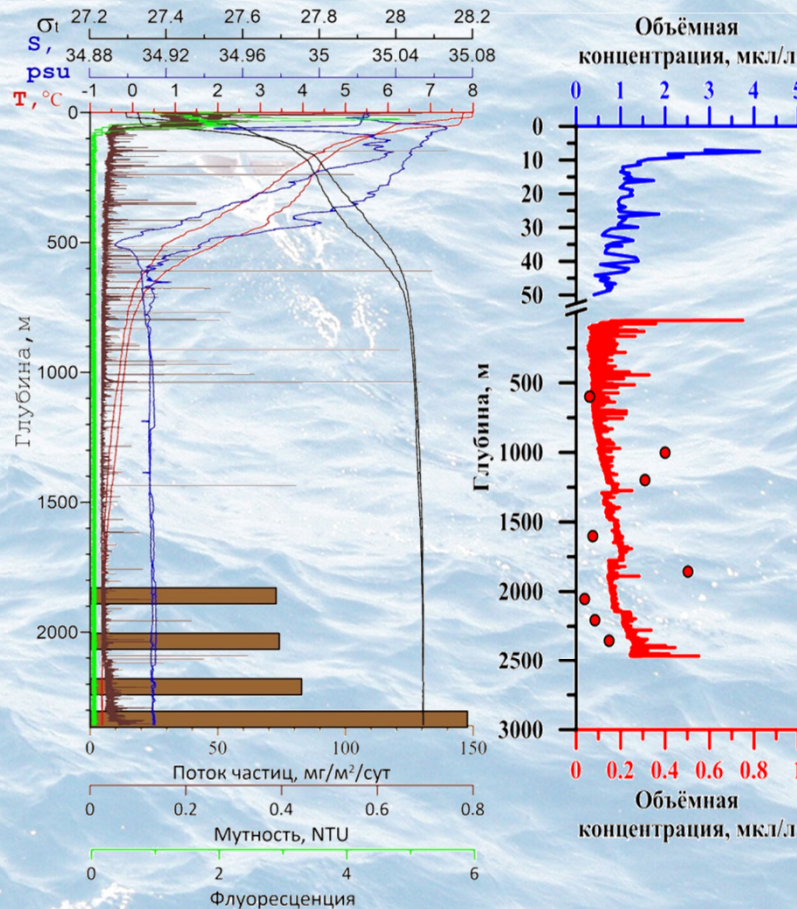
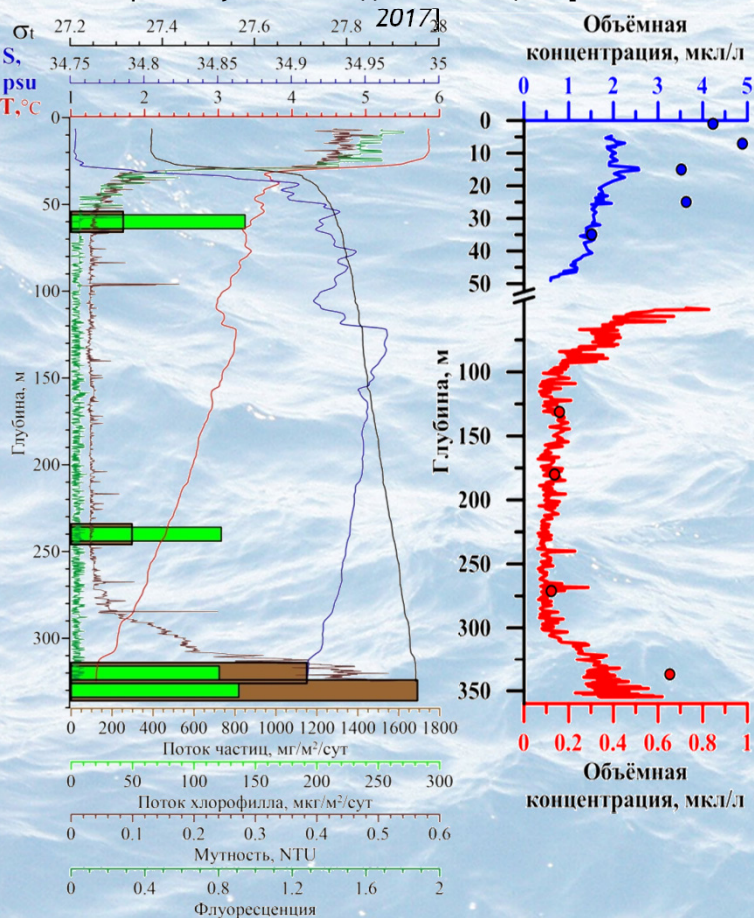
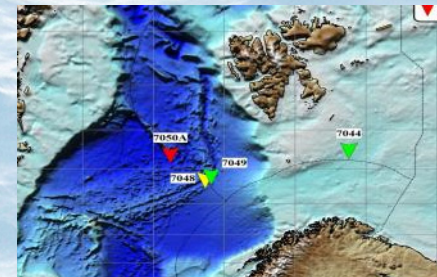
Результаты работы временных АГОС:

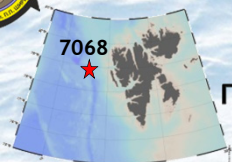
вертикальные потоки вещества и данные STD-зондирований при постановке и подъеме (температура, соленость, мутность, флуоресценция, взвесь)

Медвежинский желоб, Баренцево море

«кратер», образованный в результате масштабного выброса метана при отступлении ледникового щита [Andreassen et al.,

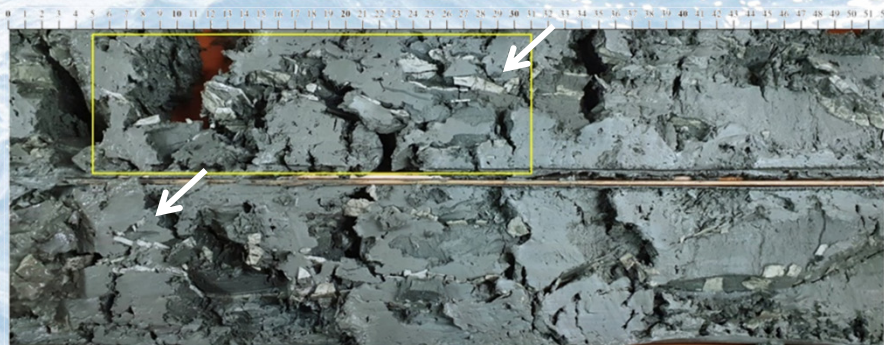
Гидротермальное поле Локи-Касл, хребет Мона, Гренландское море





Пластины газогидрата в осадках колонки 7068, хребет Вестнеса (глубина 1206 м, длина колонки 552 см)

Белые пластины во вмещающих осадках нижней секции колонки



Карбонатные корки из колонки 7068

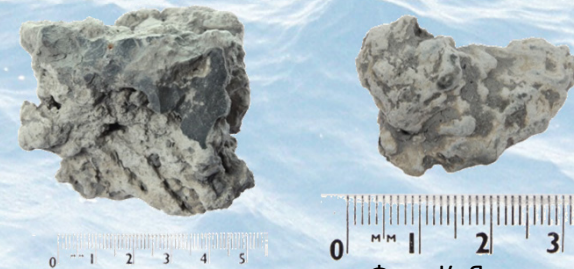


Фото К. Якимовой

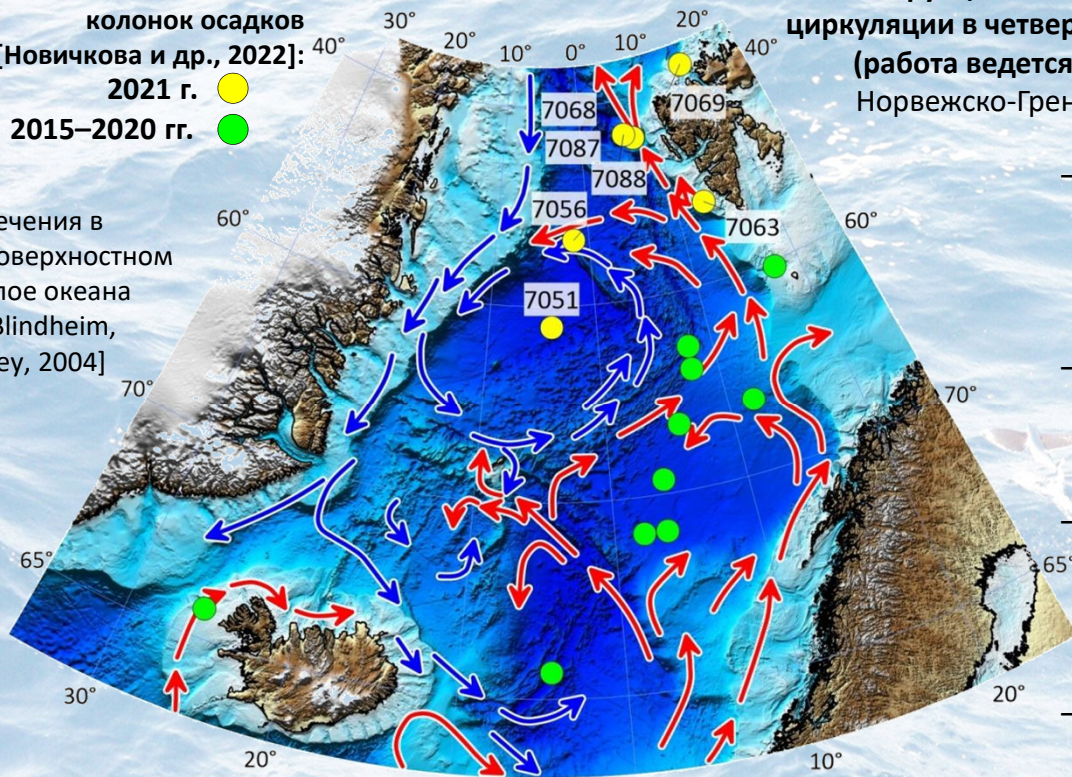
→ Возраст осадков нижней части колонки и время образования газогидратов ~35 тыс. лет [Новичкова и др., 2022].

Глуководный Норвежско-Гренландский бассейн с проливом Фрама и мелководное Баренцево море - ключевые регионы для трансформации водных масс в «арктическом средиземноморье». Активная трансформация теплой и соленой атлантической воды на контакте с полярной водой сопровождается также биогеохимическими изменениями ее растворенных и взвешенных веществ, превосходящими ожидаемое преобразование состава в результате простого смешения водных масс разного генезиса [Laukert et al., 2019]. В связи с этим повышается актуальность оценки роли гидротермальных и термогенных процессов в современном осадконакоплении. Норвежско-Гренландский бассейн пересекают рифтовые зоны ультрамедленных спрединговых хребтов, образующих дивергентную границу между Евразийской и Североамериканской литосферными плитами (проявление тектономагматической зональности).

Северный Ледовитый океан сейсмически активный регион со сложной разломной тектоникой, что способствует разгрузке флюидов на дне шельфовых морей. Важная особенность изучаемого региона - это скопление крупных залежей углеводородов и наличие протяженных зон выходов метаносодержащих растворов и газовых струй из осадочных толщ (холодных метановых сипов). В настоящее время прогнозируется распространение реликтовых метастабильных газогидратов практически на всем протяжении шельфа моря [Леин и др., 2021]. В экспедиции были обследованы районы проявления акустических аномалий в водной толще, связанных со струйно-пузырьковыми выходами газа, собраны пробы осадков и осадочного вещества водной толщи. На хребте Вестнесе (к западу от Шпицбергена) вскрыта осадочная толща двух покмарков, насыщенная пластинами газогидрата и карбонатными корками. Изучение истории осадконакопления и процессов диагенеза в этих районах позволит продвинуться в нашем понимании эволюции просачивания метаносодержащих флюидов в Арктике в настоящем и в прошлом.

Место отбора ТБД
колоннок осадков
[Новичкова и др., 2022]:
2021 г. ●
2015–2020 гг. ●

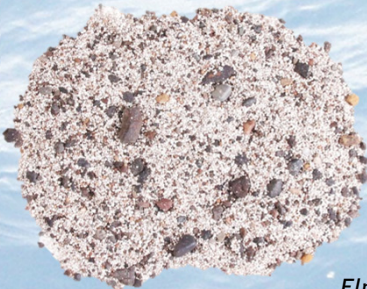
Течения в
поверхностном
слое океана
[Blindheim,
Rey, 2004]



Реконструкция изменений арктического края меридиональной океанской циркуляции в четвертичное время с детализацией за последние 15 тыс. лет.
(работа ведется под руководством Е.А. Новичковой и А.Г. Матуля):
Норвежско-Гренландский бассейн, акватории вокруг Шпицбергена и
Земли Франца-Иосифа

- Исследуются этапы формирования палео- и современного климата Европы, поступления АВ в высокие широты, а также ответного арктического сигнала вследствие выноса многолетнего морского льда через пролив Фрама.
- Выполнено изучение микрофоссилий (фораминиферы, диатомовые, палиноморфы и др.) для анализа современного и древнего состояния морской среды.
- Получены новые данные о несинхронности наступления максимума видового разнообразия микрофоссилий по мере продвижения АВ на север во время деградации ледника [Новичкова и др., 2022].
- Мощность голоценовых отложений в изученном регионе уменьшается в северном направлении (от ~440 до ~210 см), а процессы дегляциации осложняются тектоническими движениями [Новичкова и др., 2022].

Песчаная фракция осадка,
фораминиферовый песок

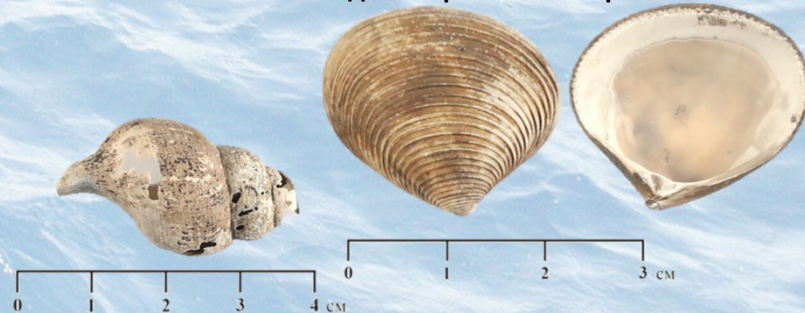


0 5 10 см

Виды бентосных фораминифер в осадках
Европейской Арктики



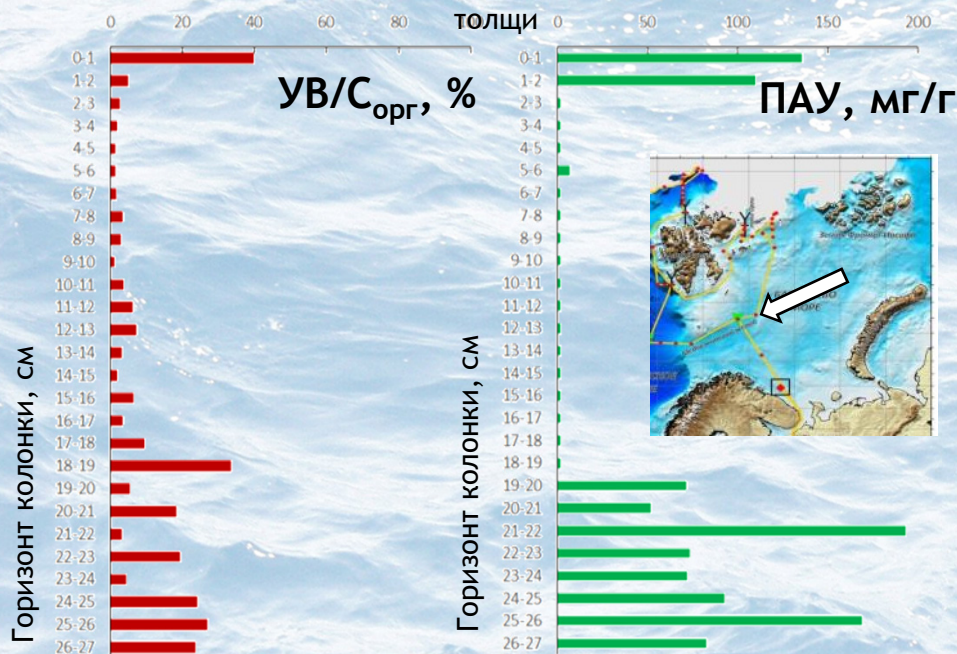
Моллюски в осадках Европейской Арктики



0 1 2 3 4 см

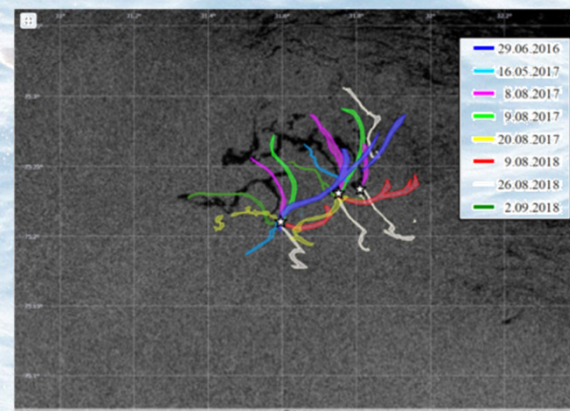
Происхождение пятен-сликов на поверхности Баренцева моря, квазипостоянно регистрируемых по данным радиолокационных спутников [Немировская и др., 2022]

Содержание органических соединений в колонке осадков, район природных высачиваний углеводородов из осадочной



→ Состав УВ, ПАУ и распределение маркеров подтверждает высачивание УВ из донных осадков, связанное с естественными подводными источниками.

→ Высачивание УВ из осадков приводит к образованию нефтяных пленок на морской поверхности, регистрируемых по радиолокационным спутниковым данным [Иванов, 2019].



Группировка пятен-сликов, связанных с подводными источниками УВ на фрагменте РЛИ спутника Sentinel-1A от 4.08.2017 [Иванов, 2019]

Частицы микропластика в поверхностном слое воды - определение с помощью малогабаритного многоканального проточного анализатора морской воды ГЕОХИ РАН

→ Максимальные значения счета микропластика достигались у восточных берегов Шпицбергена: до 400 частиц/час [В. Володин, ГЕОХИ РАН].

Сорбционное выделение ¹³⁷Cs для определения его активности в поверхностном слое воды - экспресс-анализ с помощью портативного сцинтилляционного гамма-спектрометра «Колибри»

→ Активность ¹³⁷Cs не превышала ее минимально детектируемого значения (<3.5 Бк/м³), что соответствует текущей благополучной радиационной обстановке в Арктике [В. Володин, ГЕОХИ РАН].



ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ВЫВОДЫ

Экспедиция «Европейская Арктика–2021»



- Зоны устойчивого повышения концентрации метана (до 2.01 ppm) наблюдались над Восточно-Гренландским хребтом (трансформный разлом) и трогом Орли (северо-запад Баренцева моря).
- Максимальные значения аэрозольной оптической толщи атмосферы наблюдались в проливе Фрама, что связано с выносами продуктов извержения вулканической системы Крысувик в Исландии.
- Реализован комплексный подход к исследованию поверхностного слоя моря, сочетающий судовые контактные измерения и спутниковые наблюдения с разработкой региональных алгоритмов анализа спутниковых данных; полученные данные позволяют произвести настройку параметров биооптических моделей.
- Высокоточное изотопно-геохимическое изучение вод Европейской Арктики позволило установить эволюцию изотопных характеристик АВ в процессе их поступления в Арктику.
- Изучение автохтонной составляющей взвеси выявило существенные изменения в фитопланктонном звене Европейской Арктики.
- Впервые изучены вертикальные потоки вещества над гидротермальным полем Локи Касл, а также над диффузными высачиваниями метана в «кратере» Медвежинского желоба (Баренцево море).
- Получены новые данные по эволюции просачивания метаносодержащих флюидов за последние ~35 тыс. лет на покмарках хребта Вестнеса, пролив Фрама.
- Получены новые данные о несинхронности наступления максимума видового разнообразия микрофоссилий по мере продвижения АВ на север во время деградации ледника.
- Доказано природное происхождение пятен-сликов на поверхности Баренцева моря (Медвежинский желоб), квазипостоянно регистрируемых по данным радиолокационных спутников.

ПЕРВЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЭКСПЕДИЦИИ

- *Кравчишина М.Д., Ключиткин А.А., Володин В.Д., Глуховец Д.И., Дубинина Е.О., Круглинский И.А., Кудрявцева Е.А., Матуль А.Г., Новичкова Е.А., Политова Н.В., Саввичев А.С., Силкин В.А., Стародымова Д.П.* Системные исследования осадкообразования в Европейской Арктике в 84-м рейсе научно-исследовательского судна «Академик Мстислав Келдыш» // *Океанология*. 2022. В печати.
- *Новичкова Е.А., Матуль А.Г., Козина Н.В., Малафеев Г.В., Киреенко Л.А., Якимова К.С., Грачева Е.В., Будько Д.Ф., Булохов А.В., Чернов В.А., Кравчишина М.Д.* Литологические и палеоокеанологические исследования Гренландской котловины и континентальной окраины Шпицбергена в 84-м рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш» в 2021 году // *Геология морей и океанов: Материалы XXIV Международной научной конференции (Школы) по морской геологии*. Т. IV. - М.: ИО РАН, 2021. С. 118-122.
- *Круглинский И.А., Кабанов Д.М., Почуфаров А.О., Сакерин С.М., Турчинович Ю.С., Кравчишина М.Д.* Результаты измерений оптических и микрофизических характеристик аэрозоля над Арктическими морями (экспедиции 2018-2021 гг.) // *Материалы XXVIII Международного Симпозиума «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы»*, 4- 8 июля 2022 г. Томск: ИОА СО РАН, 2022.
- и многие другие.



Авторы благодарят капитана *Ю.Н. Горбача*, экипаж НИС «Академик Мстислав Келдыш» и всех членов экспедиции за помощь и активное участие в проведении исследований, а также *А.И. Скорохода* (ИФА РАН), *С.М. Сакерина* (ИОА СО РАН) и *В.П. Шевченко* (ИО РАН) за помощь в организации газохимических, оптических и аэрозольных исследований атмосферы.