

КОМПЛЕКСНЫЕ МНОГОДИСЦИПЛИНАРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И МОНИТОРИНГ ЭКОСИСТЕМ СЕВЕРНОГО ЛЕДОВИТОГО ОКЕАНА И ЕГО МОРЕЙ

**А. С. Макаров¹, К. В. Фильчук¹, С. М. Ковалев¹, В. А. Меркулов¹,
Н. А. Куссе-Тюз¹, Д. Д. Ризе¹, О. Л. Зими́на^{2,4}, Е. Д. Добротина¹, И. А. Гангнус³**

¹*Арктический и антарктический научно-исследовательский институт,
Россия, 199397, Санкт-Петербург, ул. Беринга, д. 38,
e-mail: makarov@aari.ru;*

²*Мурманский морской биологический институт Российской академии наук (ММБИ РАН),
Россия, 183038, Мурманск, ул. Владимирская, д. 17,
e-mail: zimina@mmbi.info;*

³*Московский Государственный Университет им. М. В. Ломоносова
Россия, 119234, Москва, ул. Колмогорова, 1, корп. А,
e-mail: gangnus@inbox.ru;*

⁴*Зоологический институт Российской академии наук,
Россия, 199034, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 1.*

«Комплексные многодисциплинарные исследования и мониторинг экосистем Северного Ледовитого океана и его морей» – это один из проектов, организуемых в рамках Программы Десятилетия ООН наук об океане. Одна из основных целей этой программы – создание эффективной системы мониторинга и прогнозирования состояния морской среды, обеспечивающей накопление и обмен новыми знаниями о природе, экологии и экономике Мирового океана для устойчивого развития хозяйственной деятельности и принятия государственных решений. Научно-исследовательская станция «Северный полюс-41» на базе НЭС «Северный полюс» находится в арктическом дрейфе с начала октября 2022 г. в акватории Евразийского бассейна Северного Ледовитого океана (СЛО). Научная программа экспедиции включает более 50 видов исследований и наблюдений, которые выполняются на борту судна и в организованном на базовом ледовом поле научном лагере. Основной целью работ станции «Северный полюс-41» является выполнение комплексных междисциплинарных исследований в системе «атмосфера – ледяной покров – океан» в высоких широтах Северного Ледовитого океана в годовом цикле. Исследования направлены на выявление закономерностей действия физических механизмов, ответственных за развитие сезонных процессов и формирование межгодовых изменений во взаимодействующих геосферах. Таким образом, экспедиция «Северный Полюс-41» является основным «плацдармом» для выполнения задач Программы Десятилетия ООН наук об океане в Северном Ледовитом океане. В настоящей статье кратко изложена информация об основных исследованиях, проводившихся в экспедиции в 2022–2023 гг.

Ключевые слова: Арктика, Северный Ледовитый океан, Северный Полюс-41, НЭС «Северный Полюс», комплексные исследования, мониторинг, дрейф

Введение

Одним из основных результатов последовательных и целенаправленных экспедиционных и теоретических работ отечественных и иностранных исследовательских организаций в области наук о Земле явилось достоверное установление факта наиболее наглядного проявления глобальных климатических изменений в арктическом регионе. Современные климатические изменения в Арктике проявляются в различных компонентах окружающей природной среды и влияют на степень защищенности от природных угроз. На территории России в последние десятилетия потепление климата происходило быстрее и масштабнее, чем в среднем по Земному шару – 0.45 °C за 10 лет, и особенно быстро в Арктике, являющейся ключевой областью планетарного изменения климата, где скорость роста достигает 0.8 °C за 10 лет (Катцов, 2017). Климатические изменения увеличивают или уменьшают опасные значения гидрометеорологических величин, их повторяемость и вызывают интегральные климатические издержки (Бондур и др., 2022).

Наблюдаемые в Арктике явления, такие как таяние многолетних льдов, увеличение количества тепла, переносимого Североатлантическим течением в Арктический бассейн, интенсификация циклонической деятельности, ведут к перестройке структуры водных масс, преобразованию схем циркуляции и изменению интенсивности гидрохимических и гидробиологических процессов (Nорре et al., 2023; Ашик и др., 2022). В свою очередь, происходящие здесь изменения оказывают воздействие на климат всей Земли (Тимохов и др., 2011). Ледяной покров СЛО обладает термодинамической устойчивостью, сохраняется вот уже несколько миллионов лет и, распространяясь или деградируя, оказывает воздействие на глобальный тепловой баланс и климатическую систему планеты. В процессе взаимодействия с ледяным покровом и атмосферой образующихся и поступающих извне водных масс, их переноса и трансформации, формируются прямые и обратные термодинамические связи, которые обуславливают колебания климатического режима в Северной полярной области, распространяющиеся затем к югу (Соколов, 2010). Таким образом, динамическая система «атмосфера – морской лед – океан» является важнейшим элементом планетарного климатического механизма. Мониторинг состояния этой динамической системы по всему комплексу метеорологических, ледовых, гидрофизических, геохимических, гляциологических, геофизических, биологических и других параметров является необходимым условием достижения прогресса в решении актуальных и перспективных задач, связанных с необходимостью учета погодных и климатических факторов в ведении хозяйственно-экономической и иной деятельности. Благодаря строительству НЭС «Северный Полюс», способного самостоятельно на длительный срок вмораживаться в дрейфующий лед Северного Ледовитого океана, с осени 2022 г. удалось возобновить исследования в центральной части Арктики. Использование платформы-судна и размещение на льду разветвленного наблюдательного комплекса позволило реализовывать сложные и зачастую энергозатратные научные проекты.

В экспедиции СП-41 научному составу удалось наладить сразу несколько важных направлений: метеорологические, океанологические, гидробиологические, гидрохимические исследования ледовой поверхности. Таким образом, в экспедиции производятся многодисциплинарные комплексные исследования, соответствующие Программе Десятилетия ООН наук об океане.

Атмосферные исследования

Основой анализа климатических изменений в Центральной Арктике, равно как и прогноза погоды, являются стандартные метеорологические и аэрологические наблюдения, проведенные на дрейфующих станциях в периоды 1952–1991 и 2003–2013 гг. (Ашик и др., 2022). Продолжение таких наблюдений на дрейфующей станции «Северный полюс-41» представляется крайне важным, особенно в условиях быстро меняющегося в последнее десятилетие климата планеты.

Состав исследований

В период экспедиции измерения метеорологических параметров осуществлялись непрерывно при помощи различных приборов и оборудования. Причем проводились измерения не только стандартных метеорологических параметров, но и других специальных характеристик.

В состав стандартных метеорологических исследований и наблюдений входили измерения атмосферного давления, температуры воздуха, температуры подстилающей поверхности, относительной влажности воздуха, направления и скорости ветра, количества осадков, высоты снежного покрова по постоянным рейкам и наблюдения: степени покрытия снегом окружающей местности, облачности (количество, форма и высота нижней границы облаков), метеорологической дальности видимости (визуально и инструментально), состояния подстилающей поверхности, атмосферных явлений. При проведении метеорологических измерений в основные сроки и при регистрации метеорологических параметров в качестве основного рабочего средства использовался градиентный метеорологический комплекс Campbell Scientific. Полуавтоматическая метеорологическая станция Campbell Scientific была установлена на расстоянии 300 м от судна, на ледовой поверхности (рисунок 1).

На станции производилась непрерывная ежеминутная регистрация составляющих радиационного баланса в физических величинах Вт/м². Факультативно выполнялись измерения прямой солнечной радиации и рассеянной солнечной радиации.

Кроме того происходили исследования энерго-массообмена приземного слоя атмосферы с подстилающей поверхностью, измерение составляющих теплового баланса и потоков тепла на внешних границах и в толще морского снежно-ледяного покрова, комплексные измерения общего содержания озона и спектрального состава ультрафиолетовой радиации. Так же выполнялись запуски аэрологических зондов для измерения метеопараметров в верхних слоях атмосферы.



Рис. 1 – Общий вид метеорологической площадки на станции СП-41

Некоторые предварительные результаты

Измерения метеопараметров начали производиться с 3 ноября 2022 г. с ежеминутной дискретностью. На рисунке 2 приведены некоторые результаты стандартных метеорологических наблюдений, выполненных в декабре 2022 г.

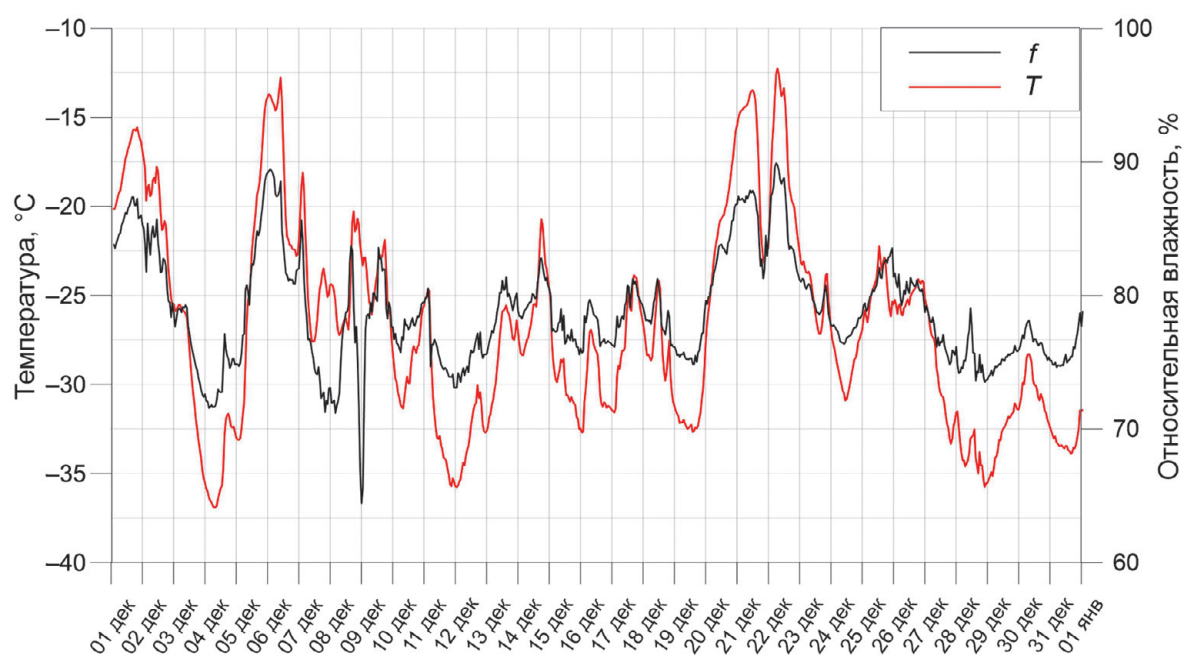


Рис. 2 – Среднечасовые значения температуры (T) и относительной влажности (f) воздуха за декабрь 2022 г.

С 4 октября 2022 г. на станции «Северный Полюс-41» выполнялись ежесуточные двухразовые температурно-ветровые аэрологические зондирования состояния тропосферы и нижней стратосферы. Эти исследования направлены на изучение состояния атмосферы в слое до 35 километров (рисунки 3а, б).

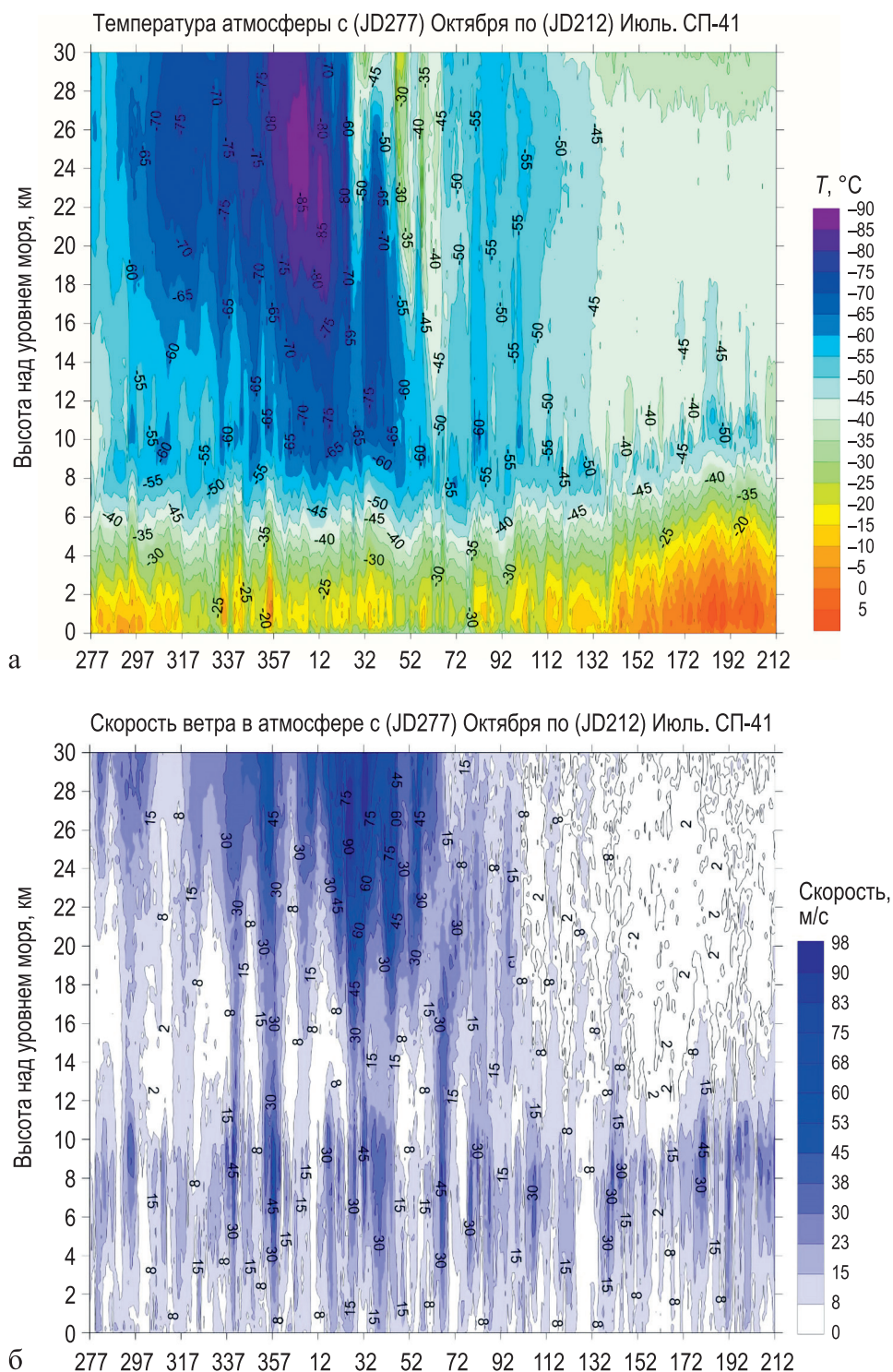


Рис. 3 – Распределение значений метеопараметров в слое 30 км с октября 2022 г. по июль 2023 г.: а – температуры; б – скорости ветра

По результатам предварительного анализа собранных метеорологических данных сделан вывод о существенных несоответствиях между прогностическими и наблюдаемыми значениями характеристик состояния атмосферы, что не противоречит результатам ранее выполненных сравнительных исследований: атмосферные модели неадекватно воспроизводят структуру пограничного слоя атмосферы, особенно при сильном радиационном выхолаживании в случае ясного неба, и нижнего километрового слоя атмосферы – при наличии облачности. Особенно велики ошибки прогноза при резкой смене синоптической ситуации. Проведение комплексных метеорологических наблюдений, дополненных прямыми измерениями потоков импульса, тепла и влаги, а также специально ориентированными экспериментами на торосистых образованиях, позволит разработать более адекватные параметризации процессов энерго-массообмена в системе «атмосфера – морской ледяной покров» и, таким образом, улучшить прогностические модели для полярных районов.

Комплексный подход, состоящий в проведении скоординированных метеорологических, аэрологических и актинометрических наблюдений при использовании данных качественного синоптического анализа в районах с минимальным влиянием орографических эффектов, позволит исследовать природу связанного с уменьшением высоты и увеличением мощности приповерхностных инверсий климатического сигнала, выявленного в результате анализа характеристик нижнего слоя полярной атмосферы, базирующегося на данных радиозондирований, выполненных на дрейфующих станциях «Северный Полюс».

Ледовые исследования

На ледовом морфометрическом полигоне ледового лагеря на регулярной основе выполнялся мониторинг строения и физических свойств ровного и деформированного дрейфующего однолетнего и многолетнего (двухлетнего) льда, их изменений в течение года и в результате динамических и термометаморфических процессов. Проводились исследования физико-механических свойств ледяного покрова, направленные на определение масштабной прочности льда на сжатие и изгиб как основного исходного параметра при оценке ледовых нагрузок на проектируемые сооружения, изучение крупномасштабной механики разрушения льда.

Состав работ

Торосы являются характерными элементами ледяного покрова замерзающих акваторий планеты. Исследование торосов необходимо для лучшего понимания природных процессов, влияющих на распределение их параметров в пространстве и эволюцию во времени, а также нужно для раскрытия фундаментальных закономерностей изменчивости ледяного покрова в целом (Харитонов, 2021; Наумов и др., 2022). По этой причине в экспедиции производились исследования торосистых образований,

а также льда вокруг них с целью определения закономерности консолидации (промерзания) тороса и оценки влияния различных факторов на этот процесс в течение годового цикла.

Также в экспедиции изучались физические свойства льда. Целью исследования являлся мониторинг строения и физических свойств ровного и деформированного дрейфующего однолетнего и многолетнего (двухлетнего) льда, их изменение в течение года и в результате динамических и термометаморфических процессов.

В ходе работ на контрольных точках вблизи полигонов однолетнего и многолетнего (двухлетнего) льда в сроки измерения метрических параметров льда, в местах определения механических свойств ровного и деформированного льда были получены вертикальные профили: температуры льда и снега; плотности льда и снега; солености льда; пределов прочности тонких круглых пластин на изгиб. Проводилось описание текстуры льда с фотофиксацией. При возможности изготавливались шлифы для определения структуры льда (Смирнов и др., 2020).

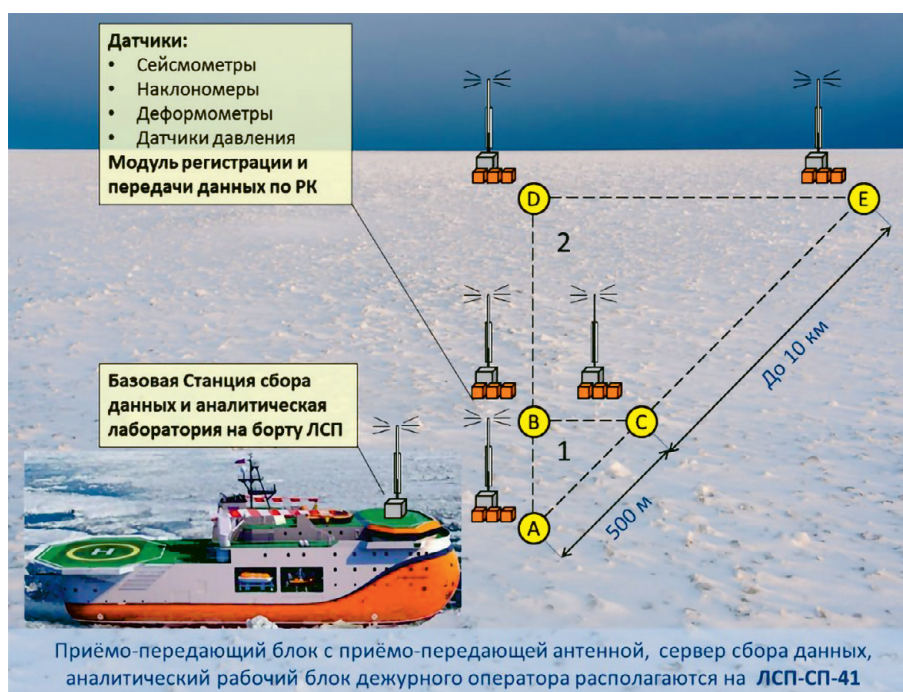


Рис. 4 – Схема расположения измерительного комплекса для исследования динамики льда

При развитии судоходства и строительстве морских сооружений в районах нефтегазовых месторождений возникают проблемы, связанные с воздействием на сооружения ледовых образований: дрейфующего и припайного льда, торосов, стамух и айсбергов (Сабодаш и др., 2022). Решение таких проблем основывается на получении исходных данных о физико-механических свойствах льда и динамических процессах, воздействующих на ледяной покров. Исследования физико-механических свойств ледяного покрова направлены на определение масштабной прочности льда на сжатие и изгиб как основного исходного параметра при оценке ледовых нагрузок

на проектируемые сооружения, изучение крупномасштабной механики разрушения льда. Целью исследования явилось получение данных о физико-механических свойствах морского ледяного покрова.

При помощи подводного гидролокационного комплекса, а также подводного телеуправляемого комплекса, производились исследования рельефа нижней поверхности ледяных образований.

Кроме того, при помощи сети различных сейсмометров и наклономеров, расположенных на дрейфующем льду (рисунок 4), изучалась динамика ледовых образований.

Некоторые предварительные результаты

В начале экспедиции в октябре месяце толщина льда оставалась практически неизменной (рисунок 5). Нарастание льда началось в ноябре месяце. Скорость нарастания льда составляла 0.40...0.54 см/сут., температурный градиент на нижней поверхности льда равнялся 0.4...0.5 °C/10 см. В декабре месяце была отмечена наибольшая скорость нарастания льда – 0.66...0.72 см/сут. В период с января до середины апреля скорость нарастания льда изменялась от 0.33 до 0.69 мм/сут. С середины апреля скорость нарастания льда начала уменьшаться, в июне нарастание льда прекратилось, с третьей декады июня началось уменьшение толщины льда. В первой половине июля был практически полностью уничтожен снежный покров, появились снежицы и началось таяние льда как снизу, так и сверху. Следствием этого стала высокая скорость уменьшения толщины льда – 1.5 см/сут. Во второй половине июля скорость таяния ледяного покрова на полигоне уменьшилась до 0.82 см/сут.

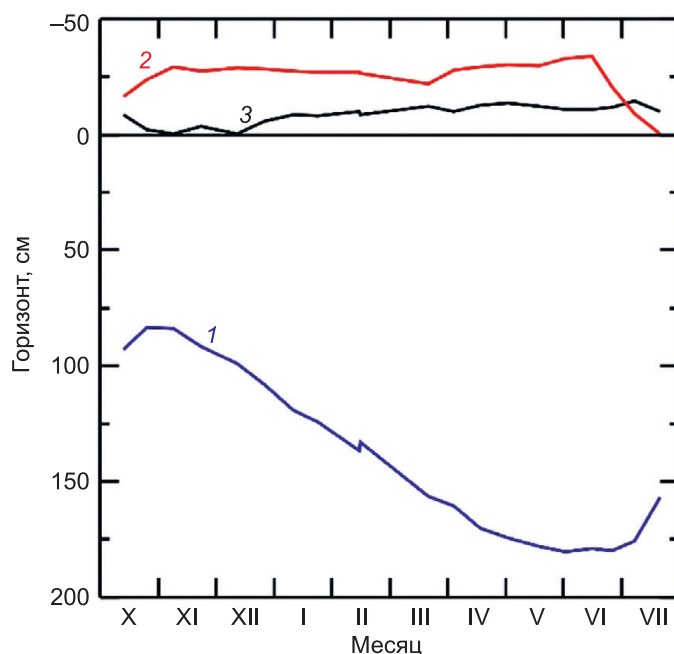


Рис. 5 – Временное изменение толщины льда (1), высоты снега (2) и превышения верхней поверхности ледяного покрова над уровнем океана (3) на морфометрических полигонах

Накопленные данные имеют непосредственное оперативное значение, так как позволяют косвенно оценить динамику нарастания–таяния, снегонакопления и термометаморфических изменений в дрейфующих льдах по району дрейфа, а также дают реперную информацию для картирования ледяного покрова. Полученная информация предоставляет возможность уточнить влияние отдельных факторов, определяющих физику протекающих в ледяном покрове процессов. Кроме того, регулярные измерения толщины льда разного возраста и его физических свойств могут служить косвенной иллюстрацией состояния климата Арктического бассейна.

Накопленный массив данных позволит усовершенствовать алгоритмы анализа динамических процессов во льдах в режиме реального времени с выделением прогностических признаков возникновения опасных ледовых явлений.

Океанологические исследования

Формирование и изменчивость океанографического режима Арктического бассейна СЛО определяются широким комплексом природных факторов. Чрезвычайно важную роль при этом играет адвекция вод атлантического происхождения, являющихся основным внешним источником тепла и соли, компенсирующим теплопотери и распреснение в СЛО. Данные российских и зарубежных экспедиций 1990–2000 гг. указывают на значительное повышение температуры атлантических вод в Арктическом бассейне по сравнению с климатической нормой (Иванов и др., 2020). Атлантическая вода, поступающая в Арктический бассейн через пролив Фрама, перемещается вдоль континентального склона на восток, в значительной степени сохраняя свои свойства. Термические экранирующие слои (теплые и холодные), которые формируются на значительных по площади участках акватории Арктического бассейна, определяют условия стратификации, при которых поверхностный слой оказывается изолированным от прямого воздействия подстилающих атлантических вод (Тузов, 2021). Вместе с тем, наблюдаемая в последние годы существенная деградация ледяного покрова на трассе распространения атлантических вод в Арктическом бассейне, позволяет предположить существование теплообмена между атлантическими водами и поверхностными слоями океана (Nicolaus et al., 2022).

Состав работ

С борта НЭС «Северный полюс», а также из специального океанологического терминала, установленного на дрейфующем льду, регулярно выполнялось глубоководное термохалинное профилирование. С борта судна зондирование выполнялось посредством судового зондирующего комплекса с последующим производством гидрохимических определений в пробах морской воды с различных горизонтов. Из океанографического терминала зондирование осуществлялось при помощи

СТД-зонда. Зондирование производилось ежедневно, но иногда реже или чаще, в зависимости от характера протекания дрейфа, батиметрии, выявляемых особенностей распределения водных масс. Высокодискретное термохалинное профилирование верхнего слоя океана, выполняемое на регулярной основе, позволит определить характеристики интрузионных расслоений на периферии струи атлантических вод (Ашик, 2015).

Исследования послойной изменчивости параметров течений, направленные на выявление характеристик циркуляции водных масс по маршруту дрейфа, выполнялись посредством высокочувствительных акустических доплеровских профилографов течений, устанавливаемых на разных горизонтах. Мощность профилируемого слоя – от 100 до 600 м, пространственная дискретность – от 1 до 32 м. Протяженность рядов зарегистрированных данных была около 200 суток.

С целью изучения турбулентных потоков в верхнем слое океана в ледовом лагере выполнялась регистрация микроструктурных характеристик до глубины 450 м с использованием комплекса микроструктурного зондирования на базе турбулиметра MSS90 – всего выполнено 45 измерительных сессий (133 зондирования) (Schulz et al., 2022).

Для определения характеристик турбулентных потоков соли, тепла и импульса в подледном слое выполнялся цикл наблюдений на турбулентном измерительном кластере (рисунок 6) (Schulz et al., 2022; Фильчук и др., 2020). В составе кластера интегрированы высокодискретные акустические доплеровские регистраторы скоростей течений, СТД-регистраторы, доплеровские профилографы течений. Суммарная продолжительность измерительных сессий – 180 суток.

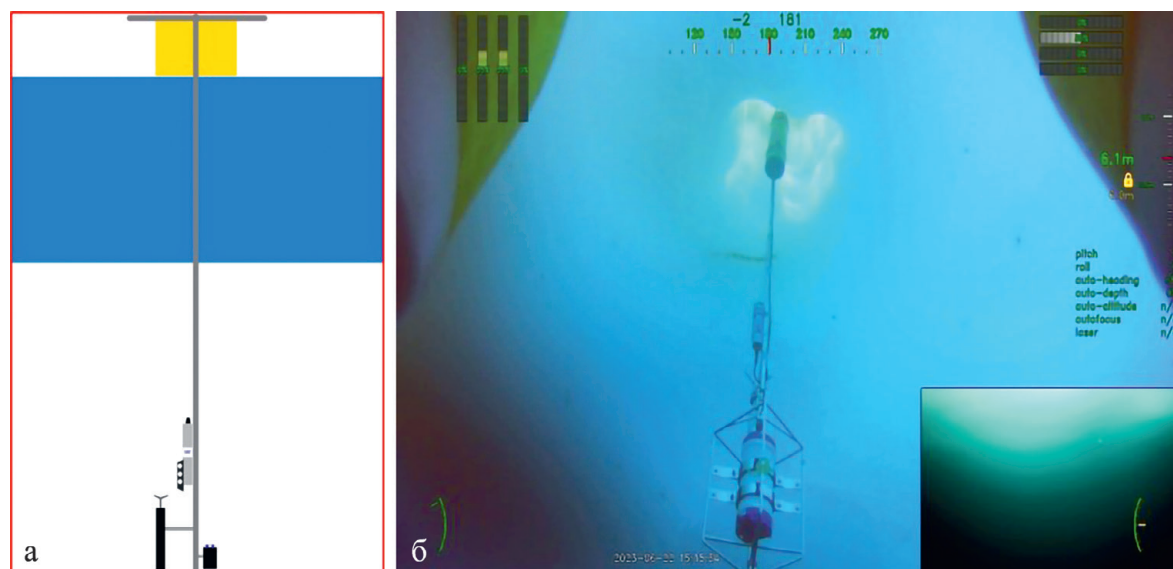


Рис. 6 – Турбулентный измерительный кластер: а – схема; б – фото под водой

Некоторые предварительные результаты

В течение дрейфа с октября 2022 г. по август 2023 г. была выполнена 271 STD-станция (рисунок 7) с измерением параметров температуры и солёности воды на различных горизонтах. Опускание зонда производилось до глубин не меньше 1500 м, поэтому на протяжении всего дрейфа были получены термохалинные данные значительной части Евразийского бассейна Северного Ледовитого океана.

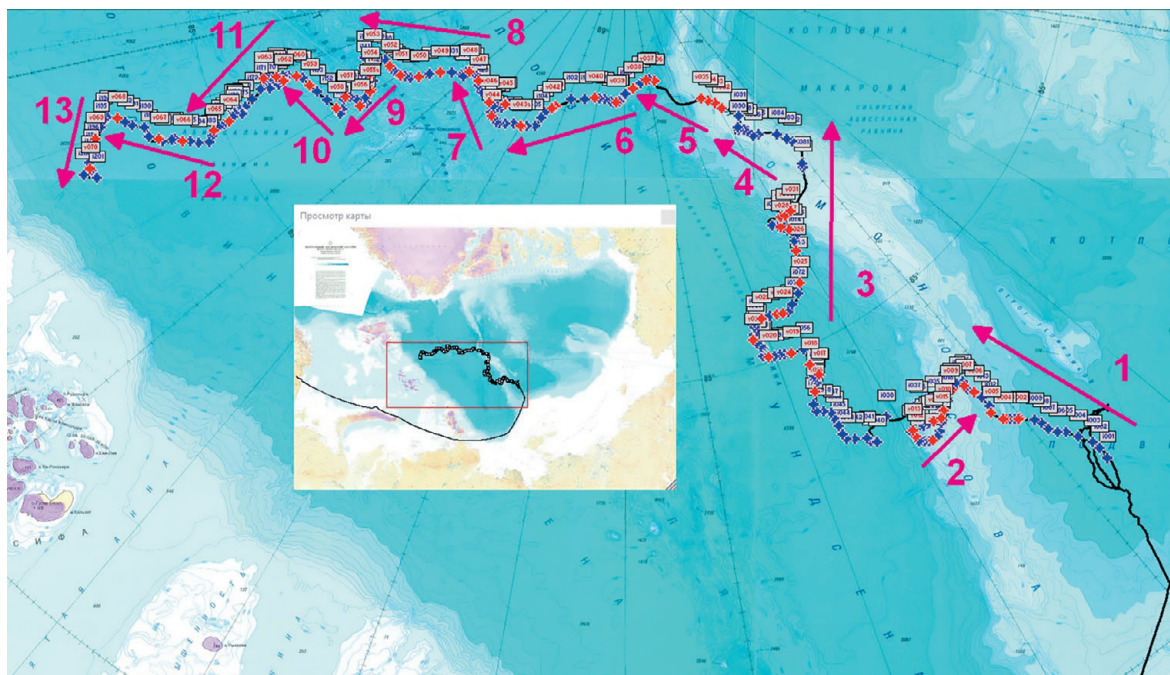


Рис. 7 – Карта океанографических станций, выполненных в экспедиции «Северный полюс-41». Красным цветом обозначены станции, выполненные с борта судна, синим – со льда. Стрелками с цифрами обозначены выбранные разрезы

По данным термохалинных измерений можно сделать некоторые выводы о состоянии водных масс Северного Ледовитого океана в различных его частях. В частности интересно то, как изменяются параметры атлантической водной массы при продвижении дрейфа с востока на запад. Восточнее хребта Ломоносова температура ядра атлантической водной массы составляет около 1.2 °С. При движении над хребтом Ломоносова (севернее) температура ядра уменьшается с 1.3 до 1.28 °С. Западнее хребта Ломоносова в котловине Амундсена отмечено постепенное увеличение температуры атлантической водной массы до 1.6 °С, а при пересечении хребта Гаккеля происходит ее резкий скачок до значений выше 2 °С. На разрезе 13 максимальное значение температуры в ядре атлантической водной массы составило 2.39 °С.

В районе разрезов 4, 5 и 6 в слое ВКС наблюдалось наличие некоторой фронтальной зоны, вероятно, обусловленной влиянием вод тихоокеанского происхождения (рисунок 8). В последующем это предположение будет подтверждено данными гидрохимических исследований.

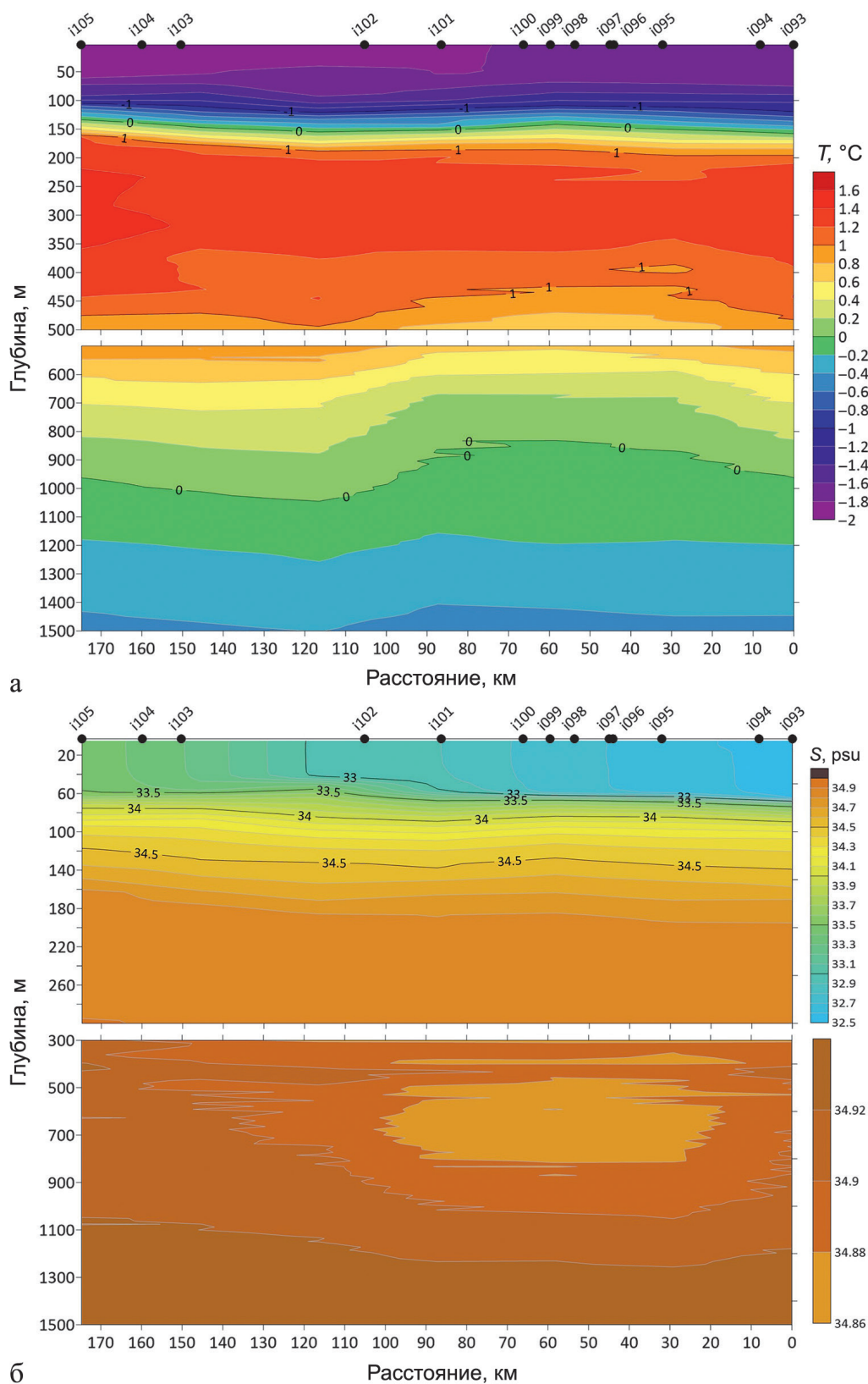


Рис. 8 – Пространственно-временное распределение термохалинных характеристик на разрезе № 6: **а** – температуры; **б** – солёности

Собранные в процессе выполнения исследований в рамках океанографического раздела научной программы дрейфующей станции «Северный полюс-41» материалы пополняют специализированные базы данных, содержащие информацию о состоянии и динамике элементов климатической системы. Продуктом последующего анализа будут количественные и качественные оценки изменений гидрологического, гидродинамического и гидрохимического режимов Арктического бассейна Северного Ледовитого океана, связанных с сокращением арктического морского ледяного покрова в 1990–2000-е годы.

Новые уникальные данные океанографических и ледовых наблюдений, выполняемых с октября 2022 г. по настоящее время в глубоководной части Арктического бассейна на станции «Северный Полюс-41», дополненные имеющимися в открытом доступе данными океанографических и ледовых наблюдений с других измерительных платформ, будут обработаны и проанализированы совместно с аналогичными данными, полученными на других российских дрейфующих станциях «Северный Полюс», что позволит выявить зоны наиболее значимых изменений. Дополнительно к данным прямых измерений для анализа будут привлечены спутниковые данные, продукты океанских реанализов и результаты численного моделирования, которые позволят расширить область исследования с ограниченных по пространству районов дрейфа НЭС на весь СЛО и таким образом получить общую картину происходящих изменений океанографического режима СЛО в условиях меняющегося климата.

Гидрохимические и экологические исследования

Изменения в притоке вод атлантического происхождения отражаются на количестве тепла, поступающего на шельф. В последние годы отмечено усиление влияния придонных вод зимнего происхождения на центральную часть моря Лаптевых и СЛО (Тимохов и др., 2015). Эти воды богаты биогенными элементами и плохо насыщены кислородом. Однако анализ придонного распределения растворенного кислорода на шельфе моря Лаптевых за периоды 1950–1993 и 2007–2014 гг. показывает увеличение абсолютных концентраций и насыщенности вод кислородом в центральной части моря в последние годы по сравнению с предыдущим климатическим периодом (Савельева и др., 2021). Происходят изменения суммарного запаса биогенных элементов на шельфе, уменьшаются объемы заморных вод в центральной части моря Лаптевых, поступающих с континентального склона в СЛО, что может также сказываться на объемах первичной продукции и вызвать изменения в состоянии донных сообществ.

Взаимодействие целого ряда разнонаправленных биогеохимических процессов под воздействием климатических изменений приводит к перераспределению объемов минеральной базы первичной продуктивности, изменениям кислородного режима моря, положения районов фотосинтетической активности и ее интенсивности, что сказывается на общем состоянии и функционировании экосистемы моря.

Состав работ

Целью гидрохимических исследований, выполненных в экспедиции СП-41, являлось изучение современного состояния основных гидрохимических характеристик Арктического бассейна СЛО. В период исследований специалистами получены новые данные о пространственной изменчивости основных гидрохимических показателей в исследуемых водах, о минеральном составе снега и морского льда, о содержании растворенного кислорода, аммония, силикатов, фосфатов, нитратов и нитритов, величине рН на стандартных горизонтах по ходу дрейфа и о химических свойствах морского льда и распределении в его толще солености, минеральных форм биогенных элементов, органического углерода и общего азота.

Отбор проб морской воды осуществлялся батометрами Нискина с использованием имеющегося на судне оборудования. Пробы воды из батометра переносились в специально подготовленные для конкретных методов анализа стеклянные и полиэтиленовые емкости. Привязка точек отбора проб к заданным координатам осуществлялась с помощью системы спутниковой навигации GPS.

Отбор проб снежного покрова (интегральных) и морского льда для определения компонентов минерального состава производили в специальные транспортные контейнеры, изготовленные из инертных материалов. При этом отбиралась интегральная проба от поверхности снежного покрова до подстилающей ледяной поверхности. Керна льда непосредственно на месте отбора разделяли на 3–4 части и помещали каждый сегмент в специальный контейнер. После доставки в полевую лабораторию пробы растапливали в герметично закрытом контейнере при комнатной температуре; после растапливания разливали образовавшуюся воду по подготовленным емкостям с использованием сифонной трубки, чтобы свести к минимуму взаимодействие пробы с атмосферой лаборатории.

Некоторые предварительные результаты

По гидрохимическим показателям над хребтом Ломоносова в районе 87–88° с. ш. (станции v032 – v035, разрез № 5 на карте рисунка 7) в подповерхностном слое воды (50–80 м) обнаружено присутствие тихоокеанских водных масс. Оно определяется по повышенному содержанию биогенных веществ (рисунок 9), соотношению содержания нитратов и фосфатов и пониженному содержанию кислорода (Хен, 2015). Влияние этих вод распространяется на гидрохимические характеристики как поверхностного слоя, так и нижележащих атлантических вод (в первую очередь по увеличению содержания растворенного кремния). Увеличение концентраций биогенных веществ в поверхностном слое повышает потенциальную биологическую продуктивность данной акватории.

К западу от хребта Ломоносова (на дистанцию до 100 км) на глубинах 70–80 м отмечены тонкие прослойки с локальным повышением содержания кремния, что свидетельствует о локальном интрузионном проникновении трансформированных тихоокеанских вод в слое галоклина на значительные расстояния от ареала их основного распространения.

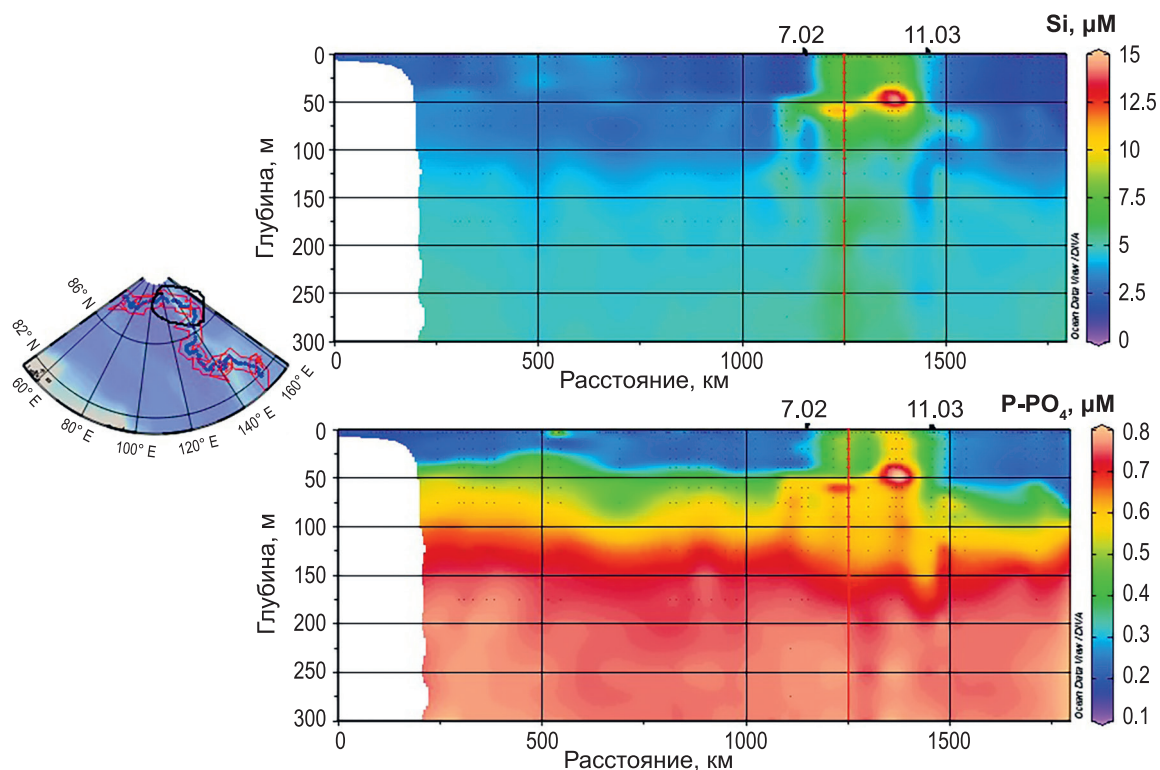


Рис. 9 – Вертикальное распределение содержания кремния и минерального фосфора в верхних слоях воды (0–300 м) по всему ходу дрейфа СП-41 с октября 2022 г. по конец апреля 2023 г.

Мощность верхнего квазиоднородного слоя воды, обедненного биогенными элементами и обогащенного кислородом, возрастает с 50–70 м в середине марта до 100–110 м в конце июня и снова уменьшается в течение июля.

Гидробиологические исследования

Происходящие в последние десятилетия климатические изменения характеризуются сокращением площади ледяного покрова, колебаниями объемов речного стока и сроков весеннего половодья на сибирских реках, изменениями в характере циркуляции атмосферы. Так в летний период наблюдается полное исчезновение Таймырского ледового массива, увеличивается приток вод речного происхождения из Карского моря в море Лаптевых и далее в СЛО (Осадчиев, 2021). Эти изменения влияют на характер биогеохимических процессов функционирования экосистем. Так же меняется и структура водной толщи. Распреснение поверхностного слоя за счет речного стока и таяния льда усиливает стратификацию и снижает интенсивность вертикального перемешивания, это приводит к обеднению верхнего продуктивного слоя биогенными элементами, что, в свою очередь, отражается на интенсивности фотосинтеза и продуцирования органического вещества. В то же время сокращение площади ледяного покрова вызывает рост продолжительности безледного периода,

а увеличение влияния речного стока повлечет за собой расширение зоны речного выноса. В настоящий момент крайне слабо изучено влияние указанных процессов на характер протекания биогеохимических процессов в СЛО в зимний период, что потребовало и еще потребует выполнения значительного объема гидробиологических исследований в экспедиции СП-41.

Состав работ

Гидробиологические исследования ориентированы на изучение того, как сильные сезонные возмущения влияют на динамику планктона, потоки взвешенных частиц и углерода, а также на процессы, происходящие в морском льду. Необходимо было изучить взаимосвязь между сезонной динамикой вертикальных и горизонтальных процессов переноса взвешенного вещества и того, как биологические процессы в водно-ледовой системе изменяются в ответ на меняющийся климат. Важно оценить общие изменения видового состава и количественных параметров фитопланктона и зоопланктона и исследовать различия в липидном составе пелагических сообществ, связанных со льдом, и в открытой воде, для прогнозирования будущего воздействия климата на пищевые цепи.

Кроме того, необходимо исследовать видовой состав и структуру сообществ зообентоса, изучить вертикальное распределение организмов зообентоса в толще грунта. Так же интересны особенности трофической структуры бентосных сообществ.

При проведении криобиологических исследований в отбираемых ледовых пробах осуществлялись измерения толщины, температуры, солености, концентрации биогенных элементов, а также видового состава биоты.

Керны льда отбирались при помощи ледовых инструментов. Полученные пробы использовались для учета численности и биомассы всех групп организмов, населяющих лед. Ледовые керны разделялись на 3 или более частей в зависимости от структуры льда: лед снежного генезиса, лед водного генезиса и наиболее богатая диатомовыми водорослями и другими организмами нижняя часть.

Планктонные ловы выполнялись тотальной сетью Джели (с диаметром входного отверстия 37×50 см и планктонным газом 150 мкм) в слое от 0 м до дна (рисунк 10).

Пробы для анализа на содержание хлорофилла *a* отбирались на каждой судовой океанографической станции батометрами Нискина в верхних 100 м по стандартным слоям. После фильтрации на фильтрах GF/F образцы обрабатывались в судовой лаборатории.

Пробы для анализа на содержание фитопланктона и микропланктона отбирались батометрами Нискина по трем слоям (поверхность, пикноклин, ниже пикноклина) в фотическом слое. Пробы фиксировались раствором Люголя для обработки в лаборатории для определения таксономического состава и биомассы.



Рис. 10 – Отбор проб зоопланктона при помощи сети Джеджи

Некоторые предварительные результаты

Для анализа количественного состава зообентоса по маршруту дрейфа проведен отбор и промывка проб донного осадка из бокс-корера. Отобрано 52 пробы на 52 станциях. Для анализа качественного состава донной фауны осуществлен отбор проб донного осадка при помощи малой биологической драги. Отобрано 40 проб на 40 станциях.

Проведена первичная разборка проб и сортировка по таксономическим группам. Пробы зафиксированы 4 % формалином, 75 % и 95 % этанолом для дальнейшего анализа.

Сделан первичный количественный анализ проб зообентоса и планктона (рисунки 11, 12). В пробах определялось общее количество таксонов (идентификация до максимально возможного таксономического уровня), проводился подсчет количества экземпляров каждого таксона и определялась биомасса каждого таксона с точностью до 0.0001 г. Полученные значения численности и биомассы суммировались по станции и пересчитывались на площадь 1 м².



Рис. 11– Представители разных таксономических групп бентоса в пробах

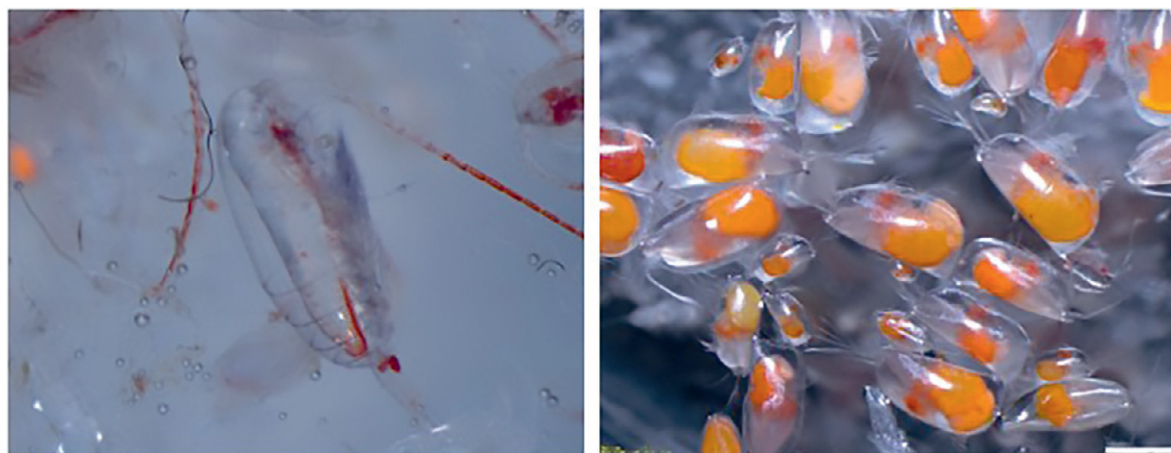


Рис. 12 – Массовые представители зоопланктона в пробах в слое 100 м – 0 м: копеоды *Calanus* spp. (слева) и остракоды *Conchoecia borealis* (справа)

Выводы

Комплексный подход к исследованиям, осуществляемый в рамках экспедиции «Северный Полюс-41», позволяет охватить широкий спектр природных процессов, происходящих в центральной части Арктического бассейна, включая метеорологические, океанологические, ледовые, биологические и гидрохимические процессы.

Организация сбора и обработки данных о состоянии окружающей среды реализуется с учетом новейших тенденций в развитии технологий наблюдений, значительного роста производительности средств передачи, хранения и обработки больших объемов информации, а также удешевления и широкого внедрения мощных вычислительных устройств.

Полученные результаты способствуют расширению архивов климатических данных, созданных на основе регулярных наблюдений советских и российских дрейфующих станций «Северный полюс», и совершенствованию системы мониторинга, осуществляемого с применением современных методов измерений и регистрации данных, новейшего научного оборудования, обеспечивающего непрерывные наблюдения основных физических характеристик приземного слоя атмосферы, подстилающей поверхности, гидросферы и ледяного покрова. Это, в свою очередь, позволяет существенно повысить качество моделирования гидрометеорологических процессов для их параметризации в прогностических и климатических численных моделях.

Развитие прогностических моделей для высокоширотной Арктики представляет собой важнейший стратегический приоритет, необходимый для обеспечения безопасного судоходства в акваториях Северного морского пути. Комплексные исследования, проводимые непосредственно на льду, позволяют выполнить серию подспутниковых экспериментов, что способствует улучшению интерпретации спутниковых изображений ледяного покрова и повышению точности картирования ледовой обстановки.

Регулярные и продолжительные комплексные наблюдения за состоянием природной среды в Центральном Арктическом бассейне на базе НЭС «Северный Полюс» создают прочную основу для формирования российской национальной арктической пространственно-распределенной научной обсерватории, включающей такие научные стационары, как ГМО Тикси, НИС «Ледовая база Мыс Баранова» и Российский научный центр на архипелаге Шпицберген, дополняя информацию, получаемую на этих станциях.

Исчерпывающее исследование системы «атмосфера – ледяной покров – океан» в центральной части Арктики является ключом к пониманию причин изменений, происходящих в климатической системе региона, и выявлению тенденций ее трансформации в обозримой перспективе. Это имеет принципиально важное научное и практическое значение и полностью соответствует национальным интересам Российской Федерации.

Список литературы

1. Ашик И. М., Алексеев В. В., Блошкина Е. В., Кулаков М. Ю., Махотин М. С., Тарасенко А. Д., Фильчук К. В. Состояние и перспективы развития системы мониторинга гидрологических условий акватории Северного Ледовитого океана // Проблемы Арктики и Антарктики. 2022. Т. 68. № 1. С. 8–25. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-1-8-25>.
2. Ашик И. М., Иванов В. В., Кассенс Х., Махотин М. С., Поляков И. В., Тимохов Л. А., Фролов И. Е., Хелеманн Е. Основные результаты океанологических исследований Северного Ледовитого океана в последнее десятилетие // Проблемы Арктики и Антарктики. 2015. № 1 (103). С. 42–56.
3. Бондур В. Г., Мохов И. И., Макоско А. А. Метан и климатические изменения: научные проблемы и технологические аспекты. М.: Российская академия наук, 2022. 388 с.
4. Иванов В. В., Фролов И. Е., Фильчук К. В. Трансформация атлантической воды в северо-восточной части Баренцева моря в зимний сезон // Проблемы Арктики и Антарктики. 2020. № 66 (3). С. 246–266. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-3-246-266>.
5. Катцов В. М. Доклад о климатических рисках на территории Российской Федерации [Текст] / В. М. Катцов. Санкт-Петербург, 2017. 106 с.
6. Наумов А. К., Скутина Е. А., Якимушкин Д. О. Пространственные изменения осадки килей торосов на акватории моря Лаптевых // Проблемы Арктики и Антарктики. 2022. № 68 (4). С. 332–351. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-4-332-351>.
7. Осадчиев А. А. Речные плюмы. М.: Научный мир, 2021. 288 с.
8. Сабодаш О. А., Бондаренко С. В., Левченко Л. Е. Анализ ледовых нагрузок от однолетних торосов на морские нефтегазовые сооружения по нормам различных стран // МНИЖ. 2022. № 1–1 (115).
9. Савельева Н. И., Добротина Е. Д., Кузьмин С. Б., Ипатов А. Ю., Гончарова А. Б., Недашковский А. П. Изменчивость гидрохимических характеристик поверхностных вод пролива Шокальского по результатам наблюдений на научно-исследовательском стационаре «Ледовая база Мыс Баранова» в 2018–2019 гг. // Проблемы Арктики и Антарктики. 2021. № 67 (1). С. 10–27. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-1-10-27>.
10. Серых И. В., Толстиков А. В. Изменения климата западной части Российской Арктики в 1980–2021 гг. Часть 1: Температура воздуха, осадки, ветер // Проблемы Арктики и Антарктики. 2022. № 68 (3). С. 258–277. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-3-258-277>.
11. Смирнов В. Н., Ковалев С. М., Шушлебин А. И., Колабутин Н. В., Знаменский М. С. Мониторинг физико-механического состояния морского льда и краткосрочное прогнозирование экстремальных ледовых явлений // Проблемы Арктики и Антарктики. 2020. № 66 (2). С. 162–179. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-2-162-179>.
12. Соколов В. Т. Комплексные исследования на дрейфующих станциях «Северный полюс» и дрейфующих базах в период МПГ 2007/08 // Программа и тезисы докладов международной научной конференции Морские исследования полярных областей земли в международном полярном году 2007/08. ААНИИ. СПб.: АПР, 2010. С. 44–45.
13. Тимохов Л. А., Ашик И. М., Карний В. Ю., Кассенс Х., Кириллов С. А., Поляков И. В., Соколов В. Т., Фролов И. Е., Чернявская Е. А. Экстремальные изменения температуры и солености воды арктического поверхностного слоя в 2007–2009 гг. // Океанография и морской лед. М.: Paulsen, 2011. С. 118–137.
14. Тимохов Л. А., Ипатов А. Ю., Хелеманн Е., Янут М., Кассенс Х. Холодные шельфовые воды моря Лаптевых летом 2013 г. // Проблемы Арктики и Антарктики. 2015. № 2 (104). С. 81–92.

15. Тузов Ф. К. Тенденции изменения интенсивности каскадинга плотных вод с арктических шельфов при сокращении ледяного покрова в морях Северного Ледовитого океана // Проблемы Арктики и Антарктики. 2021. № 67 (4). С. 318–327. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-4-318-327>.
16. Фильчук К. В., Тарасенко А. Д., Куссе-Тюз Н. А., Меркулов В. А. Опыт организации океанографических наблюдений на базе ледового лагеря в период дрейфа экспериментальной станции «судно–лед» // Проблемы Арктики и Антарктики. 2020. № 66 (3). С. 279–292. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-3-279-292>.
17. Харитонов В. В. Распределение пористости неконсолидированной части кила торосов // Проблемы Арктики и Антарктики. 2021. № 67 (1). С. 44–59. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-1-44-59>.
18. Хен Г. В., Басюк Е. О., Матвеев В. И. Параметры верхнего квазиоднородного слоя и слоя скачка температуры и хлорофилла *a* в западной глубоководной части Берингова моря летом и осенью 2002–2013 гг. // Известия ТИНРО. 2015.
19. Hoppe C., Aberle-Malzahn N., Assmy P., Balmonte J. Overview of the MOSAiC expedition: Ecosystem: Preprint // Elementa: Science of the Anthropocene. 2023. 70 p.
20. Nicolaus M., Perovich D., Spreen G., Granskog M. Overview of the MOSAiC expedition: Snow and sea ice // Elementa: Science of the Anthropocene. 2022. No. 10 (1). <https://doi.org/10.1525/elementa.2021.000046>.
21. Schulz K., Mohrholz V., Fer I. et al. A full year of turbulence measurements from a drift campaign in the Arctic Ocean 2019–2020 // Sci. Data 9. 2022. Art. 472. <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01574-1>.

Статья поступила в редакцию 28.02.2024, одобрена к печати 25.06.2024.

Для цитирования: Макаров А. С., Фильчук К. В., Ковалев С. М., Меркулов В. А., Куссе-Тюз Н. А., Ризе Д. Д., Зимина О. Л., Добротина Е. Д., Гангнус И. А. Комплексные многодисциплинарные исследования и мониторинг экосистем Северного Ледовитого океана и его морей // Океанологические исследования. 2024. № 52 (2). С. 121–144. [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2024.52\(2\).7](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2024.52(2).7).

**COMPREHENSIVE MULTIDISCIPLINARY RESEARCH
AND MONITORING OF ECOSYSTEMS IN THE ARCTIC OCEAN
AND ITS SEAS**

**A. S. Makarov¹, K. V. Filchuk¹, S. M. Kovalev¹, V. A. Merkulov¹, N. A. Kusse-Tuz¹,
D. D. Rise¹, O. L. Zimina^{2,4}, E. D. Dobrotina¹, I. A. Gangnus³**

¹*Arctic and Antarctic research institute,
38, Beringa str., St. Petersburg, 199397, Russia,
e-mail: makarov@aari.ru;*

²*Murmansk Marine Biological Institute of the Russian Academy of Sciences (MMBI RAS),
17, Vladimirskaya str., Murmansk, 183038, Russia,
e-mail: zimina@mmbi.info;*

³*Lomonosov Moscow State University
1 A, Kolmogorova str., Moscow, 119234, Russia,
e-mail: gangnus@inbox.ru;*

⁴*Zoological Institute of the Russian Academy of Sciences,
1, Universitetskaya emb., St. Petersburg, 199034, Russia*

“Comprehensive multidisciplinary research and monitoring of ecosystems of the Arctic Ocean and its seas” is one of the projects organized within the framework of the UN Decade of Ocean Science Program. One of the main goals of this program is to create an effective system for monitoring and forecasting the state of the marine environment, ensuring the accumulation and exchange of new knowledge about the nature, ecology and economy of the World Ocean for the sustainable development of economic activities and government decision-making. The research station “North Pole-41” based on the R/V “Severniy Polus” has been in the Arctic drift since the beginning of October 2022 in the waters of the Eurasian basin of the Arctic Ocean (AO). The scientific program of the expedition includes more than 50 types of research and observations, which are carried out on board the ship and in a scientific camp organized on the base ice field. The main goal of the work of the North Pole-41 station is to carry out complex interdisciplinary research in the “atmosphere–ice cover–ocean” system in the high latitudes of the Arctic Ocean in the annual cycle, aimed at identifying the patterns of action of the physical mechanisms responsible for the development of seasonal processes and the formation interannual changes in interacting geospheres. Thus, the North Pole-41 expedition is the main “springboard” for fulfilling the tasks of the UN Decade of Ocean Sciences Program in the Arctic Ocean. This article briefly summarizes information about the main research carried out during the expedition in 2022–2023.

Keywords: Arctic, Arctic Ocean, North Pole-41, R/V “Severniy Polus”, comprehensive research, monitoring, drift

References

1. Ashik, I. M., V. V. Alekseev, E. V. Bloshkina, M. Yu. Kulakov, M. S. Makhotin, A. D. Tarasenko, and K. V. Filchuk, 2022: Sostoyanie i perspektivy razvitiya sistemy monitoringa gidrologicheskikh uslovij akvatorii Severnogo Ledovitogo okeana (State and development prospects of the hydrological monitoring system of the Arctic Ocean). *Arctic and Antarctic Research*, **68** (1), 8–25, <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-1-8-25>.
2. Ashik, I. M., V. V. Ivanov, H. Cassens, M. S. Makhotin, I. V. Polyakov, L. A. Timokhov, I. E. Frolov, and E. Hölemann, 2015: Osnovnye rezul'taty okeanologicheskikh issledovanij

- Severnogo Ledovitogo okeana v poslednee desyatiletie (Main results of oceanological studies of the Arctic Ocean in the last decade). *Arctic and Antarctic Research*, **1** (103), 42–56.
3. Bondur, V. G., I. I. Mokhov, and A. A. Makosko, 2022: *Metan i klimaticheskie izmeneniya: nauchnye problemy i tekhnologicheskie aspekty (Methane and climate change: scientific problems and technological aspects)*. Moscow, Russian Academy of Sciences, 388 p.
 4. Filchuk, K. V., A. D. Tarasenko, N. A. Kusse-Tiuz, and V. A. Merkulov, 2020: Opyt organizatsii okeanograficheskikh nablyudenij na baze ledovogo lagerya v period drejfa eksperimental'noj stancii «cudno–led» (The experience of oceanographic observations in the ice camp during the drift of the experimental station “vessel – ice”). *Arctic and Antarctic Research*, **66** (3), 279–292, <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-3-279-292>.
 5. Hen, G. V., E. O. Basyuk, and V. I. Matveev, 2015: Parametry verhnego kvaziodnorodnogo sloya i sloya skachka temperatury i hlorofill *a* v zapadnoj glubokovodnoj chasti Beringova morya letom i osen'yu 2002–2013 gg. (Parameters of the upper quasi-homogeneous layer and the temperature and chlorophyll-*a* jump layer in the western deep-water part of the Bering Sea in summer and autumn 2002–2013). *Izvestia TINRO*.
 6. Hoppe, C., N. Aberle-Malzahn, P. Assmy, and J. Balmonte, 2023: Overview of the MOSAiC expedition: Ecosystem, Preprint. *Elementa: Science of the Anthropocene*, 2023, 70 p.
 7. Ivanov, V. V., I. E. Frolov, and K. V. Filchuk, 2020: Transformatsiya atlanticheskoy vody v severo-vostochnoj chasti Barenceva morya v zimnij sezon (Transformation of Atlantic Water in the north-eastern Barents Sea in winter). *Arctic and Antarctic Research*, **66** (3), 246–266, <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-3-246-266>.
 8. Kattsov, V. M., 2017: *Doklad o klimaticheskikh riskah na territorii Rossijskoj Federatsii* (Report on climate risks on the territory of the Russian Federation) [Text]. St. Petersburg, 106 p.
 9. Kharitonov, V. V., 2021: Raspredelenie poristosti nekonsolidirovannoj chasti kilya torosov. Problemy Arktiki i Antarktiki (Trends in porosity changes of the unconsolidated part of ice ridge keel). *Arctic and Antarctic Research*, **67** (1), 44–59, <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-1-44-59>.
 10. Naumov, A. K., E. A. Skutina, and D. O. Yakimushkin, 2022: Prostranstvennye izmeneniya osadki kilej torosov na akvatorii morya Laptevyyh (Spatial variations of the hummocks keel draft in the Laptev Sea area). *Arctic and Antarctic Research*, **68** (4), 332–351, <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-4-332-351>.
 11. Nicolaus, M., D. Perovich, G. Spreen, and M. Granskog, 2022: Overview of the MOSAiC expedition: Snow and sea ice. *Elementa: Science of the Anthropocene*, **10** (1), <https://doi.org/10.1525/elementa.2021.000046>.
 12. Osadchiev, A. A., 2021: *Rechnye plyumy (River plumes)*. Moscow, Scientific world, 288 p.
 13. Sabodash, O. A., S. V. Bondarenko, and L. E. Levchenko, 2022: *Analiz ledovykh nagruzok ot odnoletnih torosov na morskije neftegazovye sooruzheniya po normam razlichnykh stran* (Analysis of ice loads from one-year hummocks on offshore oil and gas structures according to the standards of various countries), *MNIZH*, **1-1** (115).
 14. Savelieva, N. I., E. D. Dobrotina, S. B. Kuzmin, A. Yu. Ipatov, A. B. Goncharova, and A. P. Nedashkovsky, 2021: Izmenchivost' gidrohimiicheskikh harakteristik poverhnostnykh vod proliva SHokal'skogo po rezul'tatam nablyudenij na nauchno-issledovatel'skom stacionare “Ledovaya baza Mys Baranova” v 2018–2019 gg. (Variability of surface water hydrochemical characteristics in the Shokalsky strait based on the results of observations at the “Cape Baranov Ice Base” in 2018–2019). *Arctic and Antarctic Research*, **67** (1), 10–27, <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-1-10-27>.
 15. Schulz, K., V. Mohrholz, and I. Fer et al., 2022: A full year of turbulence measurements from a drift campaign in the Arctic Ocean 2019–2020. *Sci Data* **9**, 472, <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01574-1>.

16. Serykh, I. V. and A. V. Tolstikov, 2022: Izmeneniya klimata zapadnoj chasti Rossijskoj Arktiki v 1980–2021 gg. CHast' 1: Temperatura vozduha, osadki, veter (Climate change in the western part of the Russian Arctic in 1980–2021. Part 1. Air temperature, precipitation, wind). *Arctic and Antarctic Research*, **68** (3), 258–277, <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-3-258-277>.
17. Smirnov, V. N., S. M. Kovalev, A. I. Shushlebin, N. V. Kolabutin, and M. S. Znamenskiy, 2020: Monitoring fiziko-mekhanicheskogo sostoyaniya morskogo l'da i kratkosrochnoe prognozirovanie ekstremal'nyh ledovyh yavlenij (Monitoring of the physical and mechanical state of sea ice and short-term prediction of extreme ice phenomena). *Arctic and Antarctic Research*, **66** (2), 162–179, <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-2-162-179>.
18. Sokolov, V. T., 2010: Kompleksnye issledovaniya na drejfuyushchih stanciyah «Severnyj polyus» i drejfuyushchih bazah v period MPG 2007/08 (Complex research at the North Pole drifting stations and drifting bases during the IPY 2007/08). *Program and abstracts of the international scientific conference Marine research of the polar regions of the earth in the international polar year 2007/08*, AARI, St. Petersburg, APR, 44–45.
19. Timokhov, L. A., A. Yu. Ipatov, E. Hölemann, M. Yanut, and H. Cassens, 2015: Holodnye shel'fovye vody morya Laptevyyh letom 2013 g. (Cold shelf waters of the Laptev Sea in the summer of 2013). *Arctic and Antarctic Research*, **2** (104), 81–92.
20. Timokhov, L. A., I. M. Ashik, V. Yu. Karpiy, H. Cassens, S. A. Kirillov, I. V. Polyakov, V. T. Sokolov, I. E. Frolov, and E. A. Chernyavskaya, 2011: Ekstremal'nye izmeneniya temperatury i solyonosti vody arkticheskogo poverhnostnogo sloya v 2007–2009 gg. (Extreme changes in temperature and salinity of water in the Arctic surface layer in 2007–2009). *Oceanography and sea ice*, Moscow, Paulsen, 118–137.
21. Tuzov, F. K., 2021: Tendencii izmeneniya intensivnosti kackadinga plotnyh vod s arkticheskikh shel'fov pri sokrashchenii ledyanogo pokrova v moryah Severnogo Ledovitogo okeana (Trends in the intensity of dense water cascading from the Arctic shelves due to ice cover reduction in the Arctic seas). *Arctic and Antarctic Research*, **67** (4), 318–327, <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-4-318-327>.

Submitted 28.02.2024, accepted 25.06.2024.

For citation: Makarov, A. S., K. V. Filchuk, S. M. Kovalev, V. A. Merkulov, N. A. Kusse-Tuz, D. D. Rise, O. L. Zimina, E. D. Dobrotina, and I. A. Gangnus, 2024: Comprehensive multidisciplinary research and monitoring of ecosystems in the Arctic Ocean and its seas. *Journal of Oceanological Research*, **52** (2), 121–144, [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2024.52\(2\).7](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2024.52(2).7).