

ЛЕДОВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ЭКСПЕДИЦИИ «СЕВЕРНЫЙ ПОЛЮС-41»

30 сентября 2022 года в 08:15 по московскому времени (МСК) в координатах 82°38,746' с.ш. 154°05,896' в.д. ЛСП «Северный полюс» вошла в ледяную гавань, предварительно подготовленную НЭС «Академик Трешников» на границе обширного ледяного поля, выбранного по итогам воздушных разведок и ледоисследовательских изысканий. Воздушные ледовые разведки проводились с применением вертолета Ка-32, базирующегося на борту НЭС «Академик Трешников». Ледоисследовательские работы выполнялись в ходе высадок мобильных групп, как при посадках вертолета на поля дрейфующего льда, определяемые с воздуха как перспективные, так и с борта судна. Выход в район поиска был осуществлен по данным дистанционного зондирования Земли, с использованием спутниковых снимков Европейского космического агентства и NASA.

Выбранное ледяное поле имело размеры ~6×6 км, представляло собой сморозь из фрагментов ровного льда, приблизительно идентичных возрастных и морфометрических характеристик. Средняя толщина ровного льда, по результатам контактных измерений, составляла более 100 см, максимальная — более 120 см. Судно было ошвартовано на четыре ледовых кнехта и удерживалось на позиции в гавани продольно ориентированными швартовыми. Подъем флага дрейфующей станции «Северный полюс-41» осуществлен 2 октября 2022 года в 07:00 МСК в точке с координатами 82°37,521' с.ш. 155°31,629' в.д.

В течение октября ледовая обстановка в районе ледового лагеря сохранялась стабильной, что позволило выполнить значительный объем работ как по организации научных наблюдений на борту судна, так и по развертыванию элементов научной инфраструктуры ледового лагеря.

В течение ноября выполнялись работы по реализации программы комплексных научных исследований на борту судна и на базе развернутой инфраструктуры ледового лагеря. Транспортная поддержка обеспечивалась двумя снегоходами Yamaha VK Professional II EPS. Характер дрейфа в ноябре можно оценить как существенно неравномерный, с частыми изменениями скорости движения и курса, в некоторых случаях до 180°, следствием чего, очевидно, явилось образование трещин в базовом ледяном поле, как на периферии, так и в пределах ледового лагеря, в том числе непосредственно вблизи судна. С 27 ноября проводились работы по эвакуации дорогостоящего оборудования из лагеря на борт судна в связи с вероятной угрозой развития трещинообразования по всей площади базового поля. Выполнение ряда научных программ, в рамках которых осуществлялась исследовательская деятельность в ледовом лагере, было временно приостановлено. На базе инфра-

структуры лагеря продолжались метеорологические наблюдения, океанографическое глубоководное профилирование, велись работы по нескольким направлениям программы ледоисследований.

В первой декаде декабря процессы трещинообразования в районе ледового лагеря продолжали развиваться, происходили активные подвижки льда, оказывавшие значительные воздействия на корпус судна. В результате смещения ледяных полей судно оказалось в ледовом канале, образовавшемся при расхождении трещины, прошедшей вдоль корпуса, при этом произошел обрыв носовых швартовов правого борта. ЛСП была перешвартована лагом левым бортом к «берегу» канала. В течение второй декады декабря ледовая обстановка в районе лагеря постепенно стабилизировалась, что позволило приступить к работам по восстановлению инфраструктуры лагеря.

Подобная ситуация повторилась в феврале.

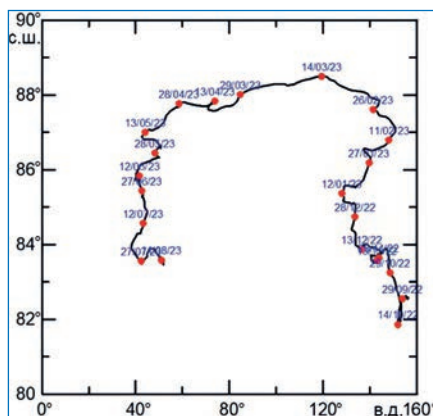
С момента швартовки ЛСП «Северный полюс» преодолела в дрейфе расстояние 1650 морских миль, генеральный дрейф составил 752 морские мили по направлению 275°. Схема дрейфа представлена на рис. 1.

Ледовые исследования включали в себя: ежедневные визуальные наблюдения за ледовой обстановкой, исследования морфометрических характеристик ровного и деформированного льда, определение физических свойств льда; исследования механических свойств льда, исследование рельефа нижней поверхности ледяных образований, исследование динамических процессов в дрейфующем льду Северного Ледовитого океана (СЛО), комплексный мониторинг пространственно-временной изменчивости различных параметров ледовой обстановки, определение толщины морского ледяного покрова с помощью подводного ультразвукового гидролокатора, аэрофотосъемку (АФС) с помощью беспилотного летательного аппарата (БПЛА) «Геоскан-401».

Состав участников: руководитель группы ледоисследований С.М. Ковалев, ведущие специалисты-ледоисследователи А.Н. Павлов, Л.В. Панов, Р.Б. Гузенко, ведущий специалист С.В. Хотченков.

12 октября был разбит морфометрический полигон размером 80×100 м, проведены измерения толщины льда, высоты снега, превышения верхней поверхности ледяного покрова относительно уровня воды. Анализ первых измерений выявил факт воздействия ветровой тени от судна на процесс снегонакопления на части полигона. Анализ полученных данных показал, что полигон разбит близко к ЛСП «Северный полюс». В результате на ближнем к судну профиле высота снега оказалась завышенной. Было принято решение перенести морфометрический полигон дальше от судна. 24 октября был разбит второй полигон на расстоянии 200 м от суд-

Рис. 1. Схема дрейфа СП-41 в период с 30 сентября 2022 года по 21 августа 2023 года



на, проведены измерения толщины льда, высоты снега, превышения верхней поверхности ледяного покрова относительно уровня воды.

24 октября, 8 и 22 ноября, 10 и 24 декабря, 8 и 21 января проведены измерения морфометрических характеристик ровного льда в 35 точках. К 11 февраля произошло разрушение второго морфометрического полигона, были проведены измерения морфометрических характеристик ровного льда в оставшихся 11 точках. 12 февраля рядом со вторым был разбит третий морфометрический полигон размером 40×50 м. Из-за уменьшившейся площади льдины и многочисленных трещин расстояние между точками было уменьшено в 2 раза. 12 февраля на третьем полигоне проведены измерения морфометрических характеристик ровного льда в 35 точках.

19 марта после разрушения третьего морфометрического полигона был разбит четвертый. Из-за уменьшившейся площади льдины и многочисленных трещин размер полигона составил 30×40 м, расстояние между профилями 10 м, расстояние между точками 5 м. 19 марта, 1, 15 и 29 апреля, 15 и 29 мая, 12 и 22 июня, 4, 17 и 30 июля и 8 августа на четвертом полигоне были проведены измерения морфометрических характеристик ровного льда в 35 точках. После измерений строились площадные распределения полученных характеристик. Пример таких распределений, полученных 21.01.2023, представлен на рис. 2. Изменение средних значений тол-

рости нарастания льда изменялась от 0,33 до 0,69 см/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 практически полностью исчез снежный покров, появились снежицы и началось таяние льда как снизу, так и сверху. Следствием этого стала высокая скорость уменьшения толщины льда: от 1,5 до 1,8 см/сут.

Исследование морфометрических характеристик ровного льда и снега в пространстве и во времени позволяет отслеживать нарастание и таяние ледяного покрова, изменение его физических свойств в течение всего годового цикла. Полученные данные имеют непосредственное оперативное значение, так как позволяют косвенно оценить динамику нарастания-таяния, снегонакопления и термометаморфические изменения на дрейфующих льдах прилегающего района, а также дают реперную информацию для картирования ледяного покрова. Полученная информация дает возможность уточнить влияние отдельных факторов, определяющих физику этого процесса. Кроме того, регулярные измерения толщины льда разного возраста и его физических свойств могут служить косвенной иллюстрацией состояния климата Арктического бассейна.

Торосы являются характерными элементами ледяного покрова замерзающих акваторий планеты. Иссле-

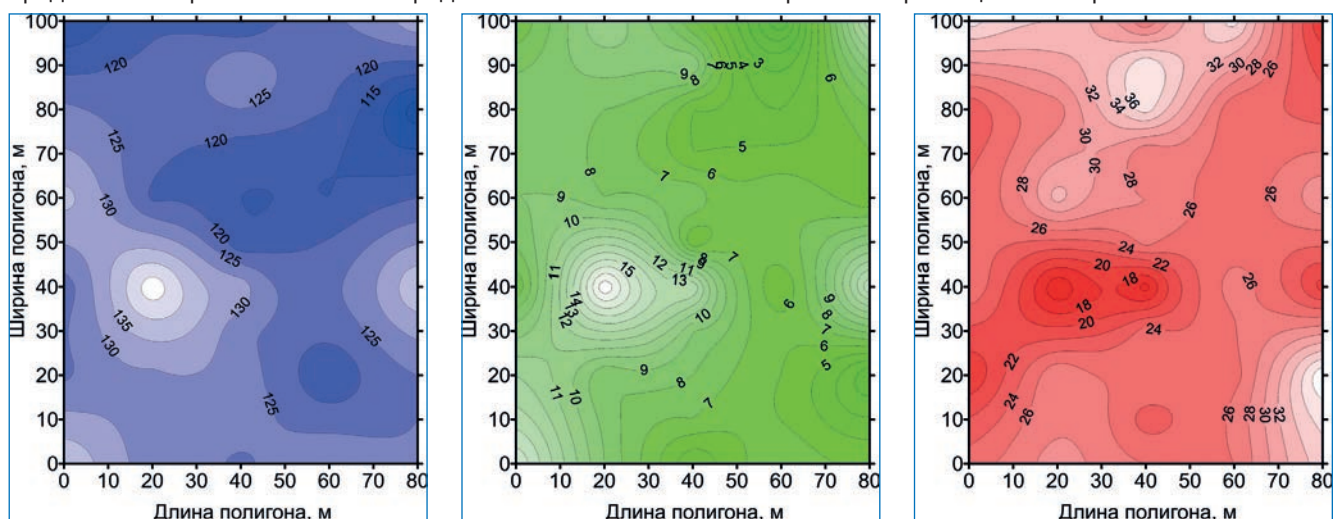


Рис. 2. Распределения толщины льда (слева) (см), превышения высоты льда над уровнем океана (в центре) (см), высоты снега (справа) (см) по площади морфометрического полигона, полученные 21 января 2023 года

щины льда, превышения высоты льда над уровнем океана и высоты снега по площади морфометрических полигонов, полученных с 12.10.2022 по 08.08.2023, приведено на рис. 3.

В начале экспедиции в октябре толщина льда оставалась практически неизменной. Нарастание льда началось в ноябре. 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 была отмечена наибольшая скорость нарастания льда 0,66...0,72 см/сут. В период с января до середины апреля ско-

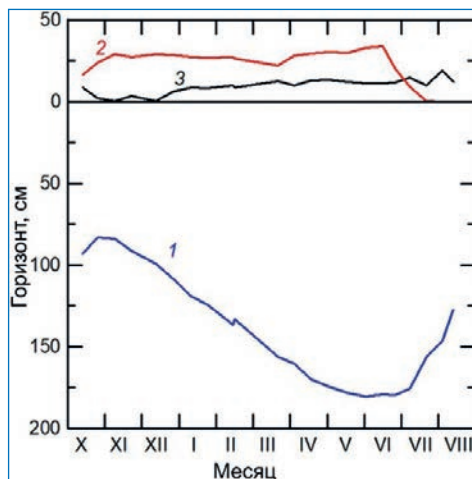


Рис. 3. Изменение средних значений толщины льда (1), высоты снега (2) и превышения высоты льда над уровнем океана (3) по площади четырех морфометрических полигонов

дование торосов необходимо для лучшего понимания природных процессов, определяющих распределение их параметров в пространстве и их эволюцию во времени, раскрытия фундаментальных закономерностей изменчивости ледяного покрова в целом. Процесс консолидации является наименее изученным природным явлением в жизни тороса. В настоящее время существуют противоположные теории относительно стадий и степени развития консолидированного слоя тороса в течение года. Исследование закономерностей консолидации передовыми методами способ-

ствуует продвижению наших знаний в этой области на новый качественный уровень и позволит существенно уточнить современные термодинамические модели ледяного покрова и ледяных образований.

Торосы, наряду со стамухами и айсбергами, являются наиболее опасными ледяными образованиями. Торосы способны существенно затруднять различные морские операции — характеристики торосов учитываются в моделях ледовой ходкости судов, которые, в свою очередь, применяются при определении оптимального пути судна во льдах. Торосы с мощным консолидированным слоем являются потенциальными носителями наибольших ледовых нагрузок на сооружения континентального шельфа. Именно характеристики консолидированного слоя тороса определяют основные нагрузки, связанные с морским ледяным покровом. Для решения проектных задач по моделированию воздействия ледяного образования на инженерное сооружение необходимо знать сезонный ход изменений ключевых параметров ледяного покрова. Эволюция консолидированного слоя тороса в течение года является одним из наиболее актуальных практических вопросов для ресурсодобывающих компаний в сфере учета ледовых нагрузок. Полученные в результате эксперимента знания позволят более обоснованно определять сроки, длительность и объем необходимых ледовых исследований.

Исследовалось шесть торосов различных размеров и возраста (старые, однолетние, свежие) разными методами — электробурением с записью параметров бурения на электронный носитель, с помощью термокос, шнековым бурением, определением физико-механических свойств, проведением гидролокационной и видеосъемки подводной части торосов, измерением ледяных блоков и др. Наиболее подробно в течение нескольких месяцев было исследовано 4 тороса (2 старых и 2 однолетних). На рисунке 4 показан процесс бурения скважины для установки термокосы на торосе № 1.

Результаты таких исследований могут быть использованы в термодинамическом моделировании ледяного покрова, а также для уточнения алгоритма определения ледовых нагрузок от ледяных образований.

Основная методическая концепция: исследование торосов должно производиться комплексом методов, описанных в Патенте «Способ определения физико-механических и морфометрических характеристик ледовых торосистых образований» (№ 2730003, зарегистрирован 14.08.2020; авторы: Бородкин В.А., Гузенко Р.Б., Ковалев С.М., Парамзин А.С., Порубаев В.С., Харитонов В.В., Хотченков С.В., Шушлебин А.И.), с добавлением измерения температуры внутренней части тороса с помощью термокос.

Определение физических свойств льда проводилось на выбранных контрольных точках вблизи полигонов двухлетнего льда в сроки измерения метрических параметров льда и в местах определения механических свойств льда. Выполнялся комплекс измерений, включающих в себя получение: вертикальных профилей температуры льда и снега; вертикальных профилей солёности льда и снега; вертикальных профилей плотности льда и снега; вертикальных профилей пределов прочности тонких круглых пластин на изгиб; описания текстуры и определения структуры льда.

Температура льда измерялась с помощью электротермометра GTH 175/MO. При помощи электромеханического бура “Kovacs Enterprise” в ледяном покрове выбуривался керн льда на всю его толщину. По длине керна перпендикулярно оси на выбранных горизонтах высверливались отверстия до середины керна. В эти отверстия поочередно вставлялся зонд с расположенным в нем первичным измерительным преобразователем температуры.

Солёность льда определялась по электропроводности талой воды из кернов. Измерения выполнялись кондуктометром типа HI 8733 “HANNA” при температуре воздуха +20 °С. Точность определения солёности льда — 0,1 ‰. При помощи бура “Kovacs Enterprise” выбуривались керны льда, из которых с заданных уровней выпиливались диски льда. Диски помещались в полиэтиленовые банки. Банки с образцами льда доставлялись в теплую лабораторию, где лед расплавлялся при комнатной температуре. Кондуктометром измерялась проводимость полученного раствора.

Плотность льда определялась путем взвешивания определенного объема льда из выбуренного керна. С заданных уровней

этого керна выпиливались образцы льда. При помощи штангенциркуля с точностью до 0,1 мм проводились четыре измерения диаметра и четыре измерения высоты ледяного цилиндра. По этим данным рассчитывался объем цилиндра. Далее ледяной цилиндр взвешивался на электронных весах. Плотность льда определялась как результат деления веса ледяного цилиндра на его объем.

Текстурный анализ проводился в лабораторных условиях. В лаборатории проводилось описание текстуры льда и фотографирование вертикальных и горизонтальных срезов с учетом ориентации.

В лабораторных условиях делались шлифы для определения структуры льда.

Пример текстуры и структуры льда приведен на рис. 5 и 6.

Для хранения кернов льда на судне использовалось холодное помещение с температурой –20...–25 °С (кер-



Рис. 4. Промер толщины льда.
Фото М.А. Емелиной

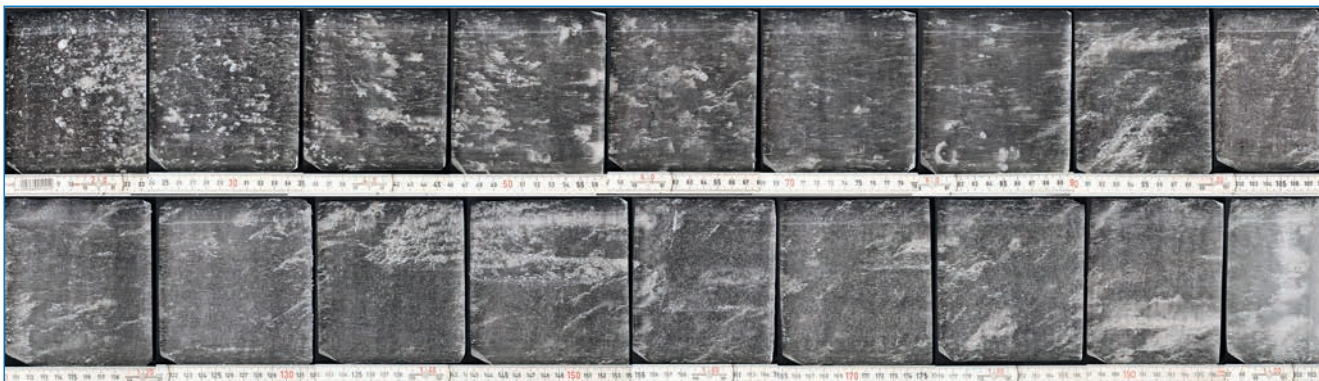


Рис. 5. Текстура ровного льда, извлеченного 29 мая 2023 года



Рис. 6. Структура ровного льда, извлеченного 29 мая 2023 года

нохранилище). Для работы с образцами льда на судне использовалось холодное лабораторное помещение с температурой $-10...-15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Для растапливания образцов льда и определения солёности на судне использовалось теплое лабораторное помещение.

Определение локальной прочности ровного льда проводилось на прямоугольных полигонах $6 \times 6\text{ м}$ с шагом 3 м . В узлах сетки шнековым мотобуром выбуривались скважины. В большинстве случаев скважины выбуривались на всю толщину льда. В скважинах при помощи скважинного зонд-индентора ЛГК с гидроэлектроприводом проводились испытания льда на прочность. Пример распределения средних по толщине льда локальных прочностей приведен на рис. 7.

Для исследования «масштабного эффекта» при определении локальной прочности проводились эксперименты по внедрению инденторов разных диаметров ($6,5; 9\text{ и }12\text{ см}$). Индентор каждого диаметра внедрялся в нескольких скважинах на горизонтах через 30 см .

Для исследования влияния скорости внедрения индентора при определении локальной прочности проводились эксперименты по внедрению индентора диаметром 9 см с разными скоростями. Индентор при каж-

дой скорости внедрялся в $2-3$ скважинах на горизонтах через 30 см .

Для исследования влияния условий при определении локальной прочности проводились сравнительные эксперименты по определению локальной прочности в «мокрых» и «сухих» скважинах. Эксперименты проводились при одном диаметре индентора (9 см), с одинаковой скоростью внедрения индентора и на одинаковых горизонтах.

Для исследования зоны разрушения при внедрении индентора были сделаны вертикальные шлифы параллельно и перпендикулярно направлению движения индентора. Для этого после внедрения индентора из скважин выпиливались блоки льда с зоной разрушения на горизонтах $30\text{ и }60\text{ см}$. Для примера на рисунках $8-10$ приведены текстура и структура получившихся зон разрушения.

На полигонах в одной точке проводился отбор образцов льда для определения физических свойств и проведения испытаний на прочность. Испытания цилиндрических образцов проводились на гидравлическом прессе ЛГК, в виде круглых пластин — на полевой испытательной машине ПИМ-200.

Рис. 7. Распределение средней по толщине ровного льда локальной прочности (МПа), 25 марта 2023 года

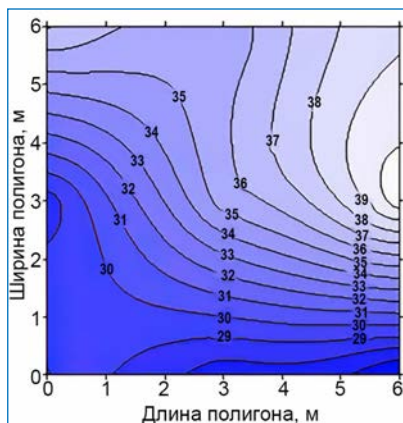


Рис. 8. Текстура зоны разрушения после внедрения индентора на горизонте 30 см , 21 июля 2023 года



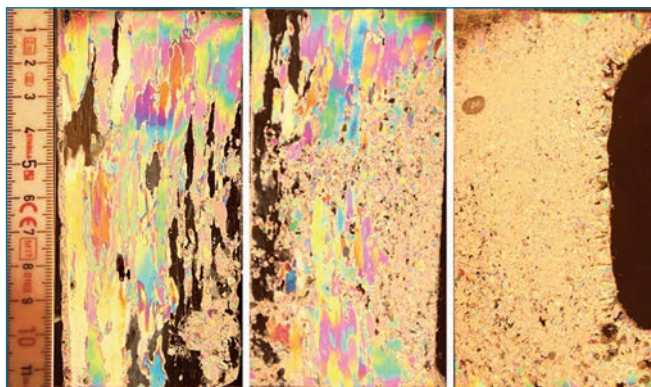


Рис. 9. Структура зоны разрушения по направлению внедрения индентора на горизонте 30 см, 21 июля 2023 года

Определения прочности образцов льда проводились во время, приближенное ко времени определения локальной прочности. Образцы льда при одноосном сжатии изготавливались из блоков льда (рис. 11) из тех же горизонтов, на которых проводилось определение локальной прочности.

Для испытания образцов льда при центральном изгибе из ледяного покрова электромеханическим буром «Kovacs Enterprise» выбуривался керн льда диаметром 140 мм. Керн распиливался на диски без пропусков или в соответствии с характером его текстуры. Толщина дисков составляла около 2 см.

В комплексе морфометрических измерений производилось обследование подводной части ровного льда и торосистых образований подводным телеуправляемым обзорным комплексом (ПТОК) на заданном полигоне, с привязкой к данным профилям и точкам полигона.

Согласно полученному представлению о распределении ледяных образований в подводной части полигона, выбирались стационарные и временные точки пунктов управления подводными комплексами. В данных пунктах производилась съемка гидролокационным комплексом (ГЛК), обследование ПТОК, охватывая заданную площадь полигона.

Данная методика позволила получить наиболее полные данные по распределению линейных характеристик подводной части ровного льда и торосистых образований на исследуемых полигонах.

В период с октября 2022 года по апрель 2023 года в подводных работах использовался в качестве ПТОК



Рис. 10. Структура зоны разрушения перпендикулярно направлению внедрения индентора на горизонте 30 см, 21 июля 2023 года

ТПА «ГНОМ Стандарт» (производство Россия, 2013) и привязная (осмотровая) система на базе камеры GoPro Hero7BE и подводного прожектора Varilux V17. С апреля 2023 года по июль 2023 года в качестве ПТОК использовался ТПА «Супер ГНОМ Про» (производство Россия, 2022) и вспомогательный комплекс панорамной подводной привязной видеосистемы (ПППВ) «ГНОМ Cam360» (производство Россия, 2022).

Гидролокационные подводные обследования осуществлялись гидролокационным комплексом на базе гидролокатора кругового обзора Imagenex 881A (производство Канада, 2013), оборудованного приводом вращения Azimuth Drive и модулем ориентации, включающим в себя компас и двухосевые датчики наклона.

Дополнительное ПО комплекса ГЛК позволяет задавать координаты, соответствующие точкам подвеса гидролокатора в местной системе координат, глубину подвеса прибора, а также корректировать направление, дифферент и крен полученного облака точек, как автоматически, так и вручную.

Результаты регулярных обследований сформированы в виде обработанных файлов данных, содержащих значения глубин подводной части ровного льда и торосистых образований, привязанных к нулю уровня воды и выполненных в локальных координатах заданного полигона.

Рис. 11. Извлечение блока льда 28 марта 2023 года. Фото С.В. Хотченкова



Использование ПТОК и камер, а также ГЛК позволило выполнить обследование ровного льда на полигоне исследования морфометрических характеристик льда (рис. 12), обследования под торосистыми образованиями для построения трехмерных моделей (рис. 13), выполнить серию экспериментов по сравнению методов измерения глубины килей торосов (рис. 14), отслеживать изменения состояния подводной части объектов исследования на полигонах работ, как ледовых, так и других, проводить обзорные съемки состояния подводной части ледяной



Рис. 12. Обзорный снимок в точке полигона исследования локальной прочности 23 апреля 2023 года

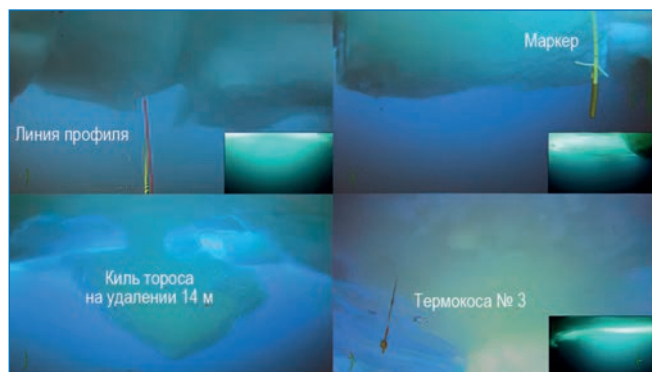


Рис. 14. Измерения килей на полигоне тороса № 3 по профилям, по маркерам, определению максимальной глубины килей тороса (первая декада июля)

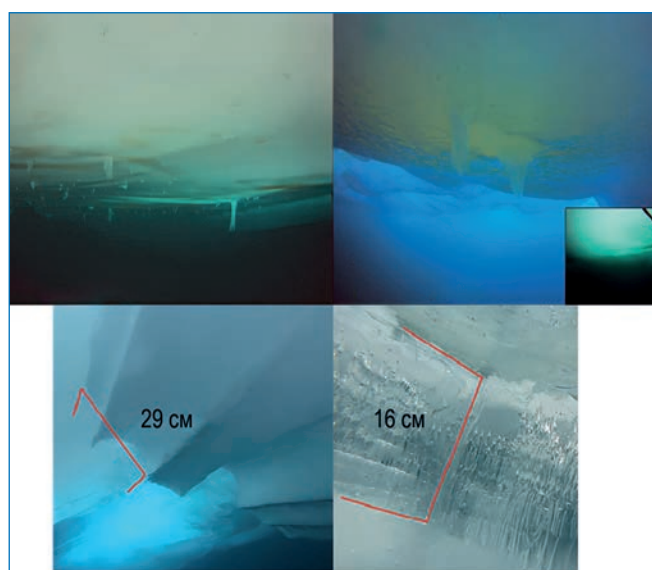


Рис. 16. Весенние солевые стоки на нижней поверхности ровного льда (3 декада апреля) и в торосе (третья декада июня), измерения толщины распресненного слоя воды подо льдом и пресного льда в снежницах (первая декада июля)

поверхности в районе станции (рис. 15, 16). Также использование ПТОК позволило провести как установку подводных приборов, так и выполнение наблюдений за состоянием установленных подводных приборов измерения (рис. 17), установленных систем измерения в торосах (рис. 18) и отслеживать состояние корпуса судна и прилегающего льда в дрейфе (рис. 19). После установки дополнительного оборудования на ПТОК проводился отбор биологических проб с нижней поверхности ровного льда (рис. 20) и подводной части торосов.

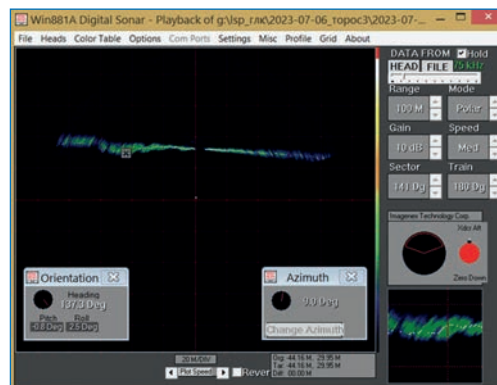


Рис. 13. Гидролокационная съемка на полигоне тороса № 2, 6 июля 2023 года

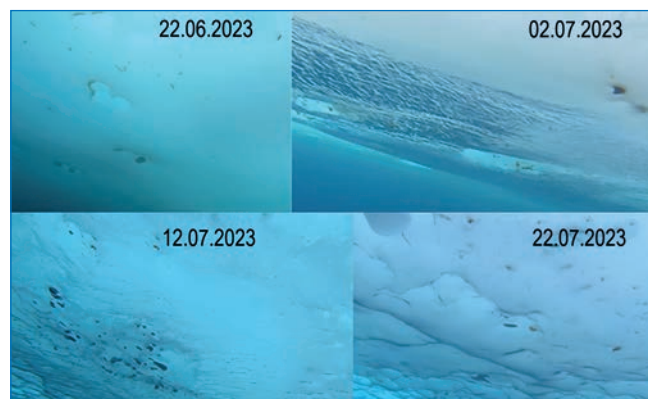


Рис. 15. Состояние нижней поверхности льда в точке отбора проб на полигоне однолетнего льда в июне-июле 2023 года

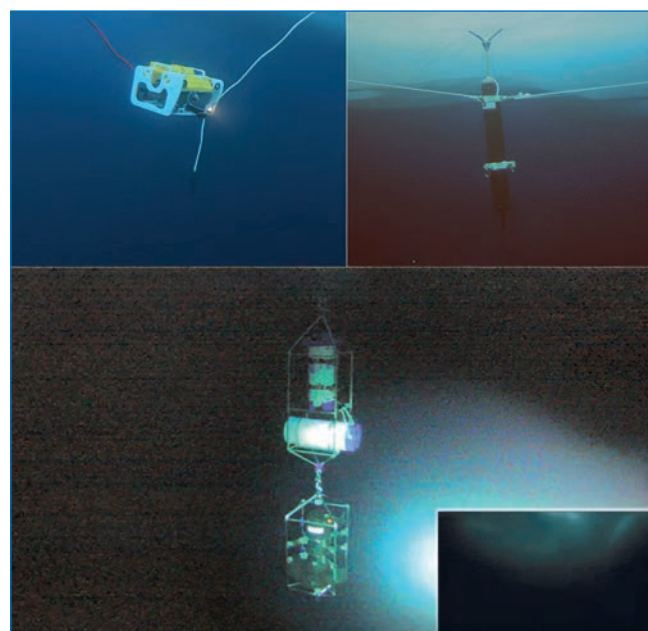


Рис. 17. ТПА «Супер ГНОМ Про» при протяжке прибора подо льдом, установленный измеритель течений в стоке снежницы, вывешенный океанологический комплекс на глубине 85 м, 29 мая 2023 года

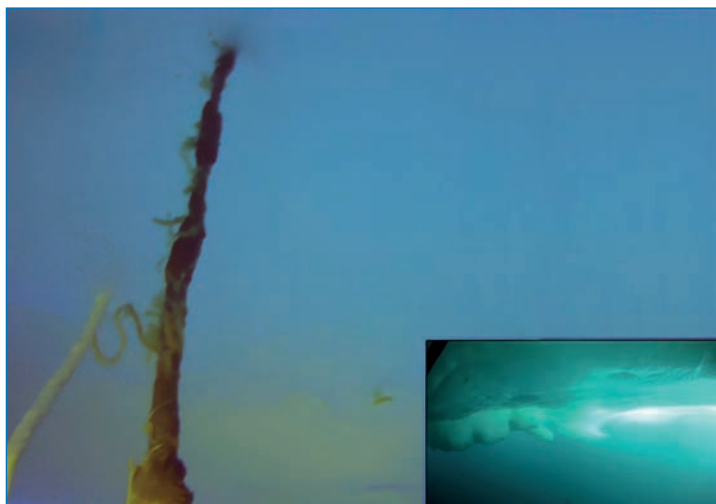


Рис. 18. Состояние нижней части термокосы в киле тороса на полигоне № 3 (первая декада мая 2023 года)

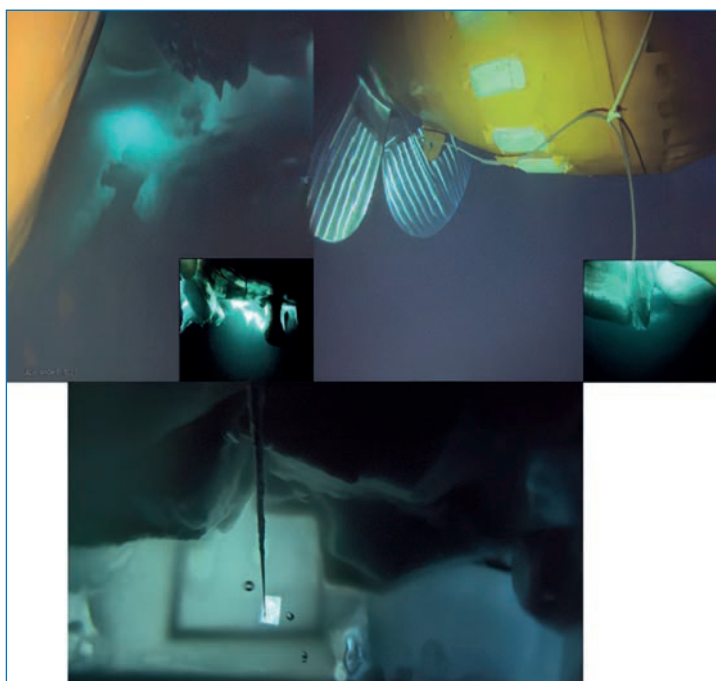


Рис. 19. Подводная часть судна и рулевая колонка, кормовая майна

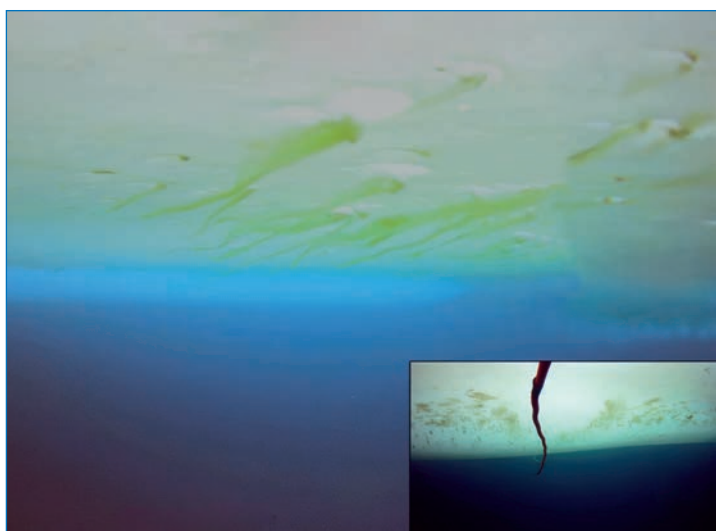


Рис. 20. Место отбора биологических проб под ровным льдом 22 июня 2023 года

За период с октября 2022 года по август 2023 года было выполнено 9 гидролокационных съемок и 38 телевизионных обследований, произведено 51 погружение для выполнения различных работ (таблица).

Таблица

Распределение по видам работ при съемках ПТОК и ГЛК

Виды работ	Объект исследования	Количество съемок
Гидролокационные съемки	Полигоны торосов	6
	Ровный лед	2
	Подводная часть судна	1
Телевизионное обследование	Полигоны торосов	5
	Полигоны ровного льда	2
	Подводная часть судна	9
	Точки отбора проб	8
	Район станции	8
	Кормовая майна	6
	Измерение ПТОК	Полигоны торосов
Установка/снятие приборов	Полигоны работ	4
Слежение за состоянием установленных приборов	Полигоны работ	7
Отбор проб ПТОК	Район станции	3
Технические работы в районе судна	Подводная часть судна	2

Для исследования динамических процессов в дрейфующем льду Северного Ледовитого океана (СЛО) использовалась система мониторинга динамики дрейфующего морского льда, созданная в ААНИИ. Данная система позволяет определять:

- характеристики объемных и изгибно-гравитационных волн, обусловленных сжатием и торшением морских льдов;
- характеристики волн зыби в диапазоне периодов до 50 с от штормов на открытой воде;
- автоколебательные процессы различного пространственно-временного масштаба;
- характеристики вертикальных колебаний ледяного покрова до 30 минут и более, связанных с короткопериодными внутренними волнами в океане;
- вектор движения и вращения ледяного поля станции;
- статистическую структуру дрейфа льда: постоянный мониторинг координат с помощью GPS с периодом дискретизации определения места не более 1 часа.

Аппаратная часть этого комплекса состояла из 5 сейсмостанций, расположенных на ледяной поверхности на расстоянии до 1,5 км по треугольной схеме, и сервера сбора, хранения и обработки полученной информации, установленного на борту судна.

- Сейсмостанция измеряет следующие параметры:
- скорости смещения ледяной поверхности по трем осям (для этого применялись 3-компонентные сейсмометры СМЕ-4311 LT с чувствительностью 4000 В/м/с),
 - наклоны ледяной поверхности по двум осям (для этого применялись 2-компонентные наклонометры ИН-Д3а-360 с чувствительностью $3 \cdot 10^{-6}$ рад/В),
 - координаты сейсмостанции (для этого применялись логгеры АРАТІТ, ВАУСАL).

Наклонометры и сейсмометры устанавливались на специально изготовленные постаменты, замороженные в лед на глубину до 80 см. Питание приборов осуществлялось от сети или аккумуляторов в зависимости от удаленности от корабля.

Полученные параметры передавались в режиме реального времени по радиоканалу на сервер, где об-

рабатывались и архивировались на электронных носители в формате miniSEED.

Непрерывная регистрация параметров ледяного покрова начата в октябре.

Установленная система позволила как получить новые данные о динамических процессах в ледяном покрове в период наблюдений, так и определить точное время и место начала образования трещин и торошений в районе ЛСП.

Судовые визуальные ледовые наблюдения проводились в соответствии с «Инструкцией по выполнению судовых ледовых наблюдений» Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет).

Визуальные наблюдения проводились ледоисследователем с мостика ЛСП «Северный полюс», в его задачу входило с возможно большей точностью отмечать все характерные особенности ледяного покрова и фиксировать все происходящие в нем изменения во времени, как во время полярной ночи, так и в течение полярного дня. Результаты наблюдений фиксировались в виде ежедневных срочных донесений и включались в диспетчерские донесения.

В качестве стандартной терминологии при описании результатов наблюдений использовались термины и условные обозначения, определенные в «Номенклатуре ВМО по морскому льду», «Атласе ледяных образований» и в Приложении Б к «Наставлению гидрометеорологическим станциям и постам. Выпуск 9. Гидрометеорологические наблюдения на морских станциях и постах. Часть I. Гидрологические наблюдения на береговых станциях и постах.»

Проводился непрерывный мониторинг ледовой обстановки в районе дрейфа с использованием судовой РЛС с подключенной системой цифровой обработки сигнала «RUTTER Sigma S6», ver. 7.03 и системой цифровой обработки сигнала «Ice Vision».

Комплекс измерений включает (непрерывный либо малой дискретности) обзор области дрейфа ЛСП

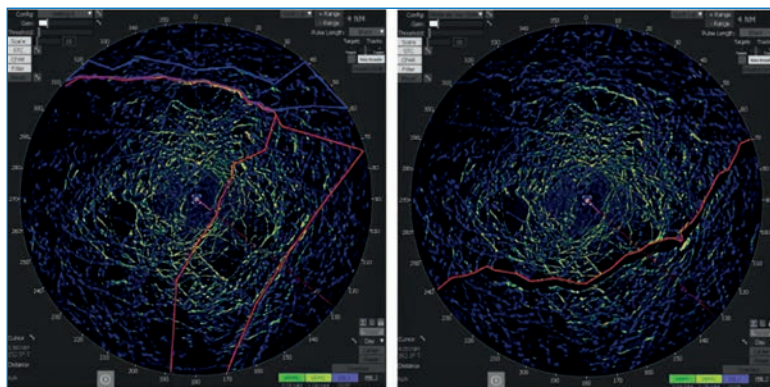


Рис. 21. Динамика изменчивости состояния ледяного покрова 22 и 30 декабря 2022 года

«Северный полюс» (7,5×7,5 км) с помощью судовой РЛС, поток сигналов которой усваивается системой Ice Navigator Sigma S6. Сканирование производилось на фиксированных режимах дальности обнаружения 4 мили и 1 мили, с периодичностью от 5 до 20 минут.

Результаты сканирования накапливались в виде массива Screen Shots формата *.jpeg, содержащих развертку РЛС-изображения и навигационную информацию для каждого режима дальности обнаружения.

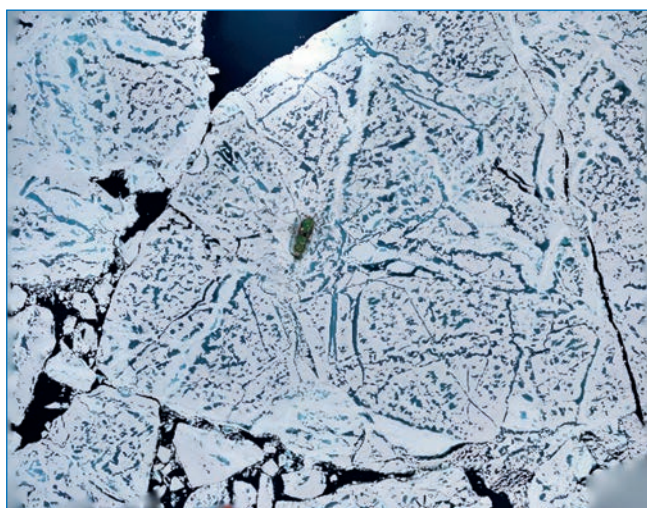
Полученный массив данных подготовлен для полуавтоматической обработки, заключающейся в обрезке полученных изображений (выделении области распределения морфологических элементов), географической привязке в формате ArcGIS и программной обработке каждого изображения массивов изображений в программной оболочке «Лед», выделяющей структурные особенности элементов морфометрии, их табличные числовые интерпретации в локальной координатной системе изображения.

Данные радиолокационного обзора позволили вести непрерывное наблюдение за ледовой обстановкой как в пределах станции, так и на удалении до четырех миль. По результатам наблюдений проводилась идентификация ледовых объектов и слежение за динамическими изменениями ледовой обстановки (рис. 21).

В мае 2023 года был подготовлен и введен в эксплуатацию беспилотный летательный аппарат (БПЛА) квадрокоптер «Геоскан-401». За период с мая по июль 2023 года выполнено 7 результативных вылетов БПЛА с аэрофотосъемкой (АФС) с высоты 100, 200, 300 м.

По результатам АФС подготовлены планы высокогорного разрешения, на базе которых составлялись общие планы льдины (рис. 22); после обработки данных АФС были получены планы распределения высот поверхности в формате PSZ. В дальнейшем данные по высотам планируется использовать для уточнения изменений на полигонах исследования торосов.

Рис. 22. Состояние поверхности льда по АФС 17 июня (слева) и 27 июля (справа) 2023 года



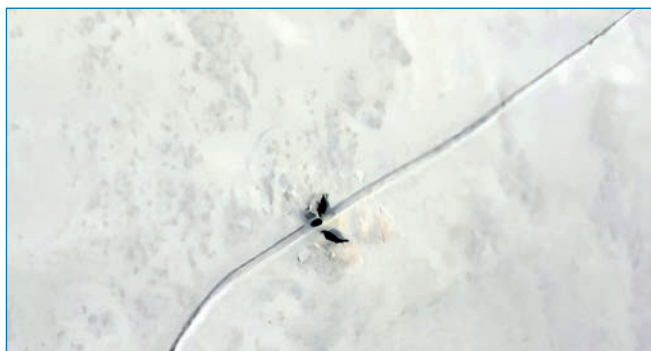


Рис. 23. Нерпы у продыха на трещине, 2,1 км от судна

Отдельные обзорные вылеты с видеокамерой позволили уточнять состояние льда на удалении от станции и производить наблюдения за животными (нерпами) на поверхности льда (рис. 23).

Во время дрейфа станции был установлен подводный ультразвуковой гидролокатор «Трезубец» (производство Россия) под ледяным покровом на глубине 30 м. Антенна гидролокатора ориентировалась вертикально вверх на ледяной покров.

Так как диаграмма направленности антенны гидролокатора «Трезубец» составляет около 15° на уровне половинной мощности, то подводный гидролокатор был установлен между трех майн (расположенных в плане, в вершинах равностороннего треугольника) в ледяном покрове с помощью трех удерживающих тросов. Расстояние между майнами составляло около 17 м. Одна из майн была крупнее для погружения гидролокатора.

Управление прибором осуществлялось оператором с компьютера. Там же выполнялась первичная обработка данных измерений.

Для измерения толщины льда применялись два подхода, что позволяет контролировать точность измерений. В стандартных алгоритмах используется время прихода отраженного импульса от нижней кромки льда в сочетании с датчиком гидростатического давления. Датчик гидростатического давления дает информацию о высоте столба жидкости над датчиком. Задав плотность льда, можно определить толщину ледяного покрова. При использовании второго подхода фиксируются времена приходов отраженного импульса от нижней и верхней кромок ледяного покрова, т. е. используется

Рис. 25. Пример линейки пьезокерамических датчиков, закрепленных через 10 см на металлическом пруте, предназначенных для вмораживания в ледяной покров

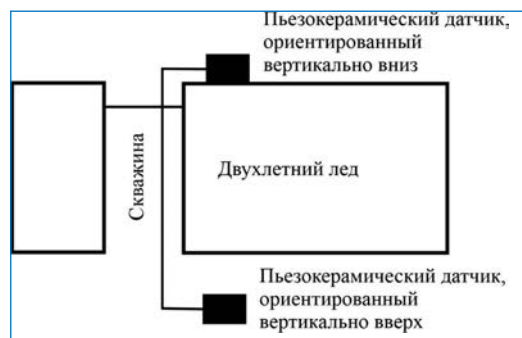


Рис. 24. Схема расположения пьезокерамических датчиков для измерения толщины и скорости звука в двухлетнем ледяном покрове

другой принцип, что позволяет сравнивать измерения для оценки их точности. Однако для работы второго подхода требуется знать градиент скорости звука по всей толщине ледяного покрова, что является отдельной задачей, которая решалась в ходе проведения исследований.

Измерения толщины льда подводным гидролокатором проводились последовательно двумя способами в непрерывном режиме с изменяемым интервалом между последовательными сеансами измерения до 3 часов.

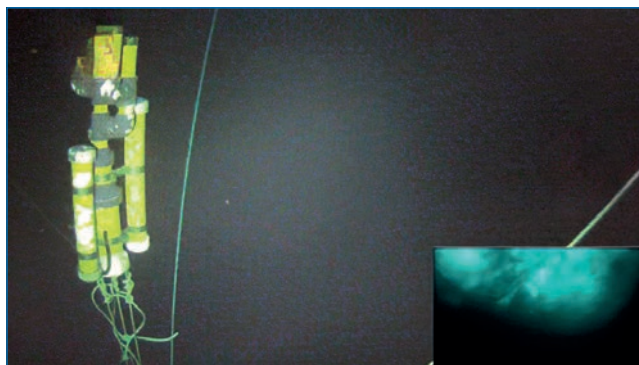
Для оценки точности измерения толщины ледяного покрова по данным подводного гидролокатора проводилось сравнение с данными о толщине ледяного покрова на ледовом полигоне, полученными контактным методом. Кроме контактного определения толщины льда проводилось определение основных физических свойств льда. В области диаметром 17 м непосредственно над подводным гидролокатором ледяной покров не разрушался.

В скважине диаметром 25 см была установлена вертикальная линейка пьезокерамических и температурных датчиков, расположенных на заданном расстоянии друг от друга. Пьезокерамические датчики для измерения толщины и скорости звука в двухлетнем ледяном покрове были установлены по схеме, показанной на рис. 24.

Нижний пьезокерамический датчик является приемо-передающим, и его антенны ориентированы вертикально вверх. Он находился на таком расстоянии от верхнего датчика, чтобы оставаться в воде в течение всего периода измерений. Все остальные датчики работали только на прием, и их антенны были ориентированы вертикально вниз в сторону дна. Фотография линейки пьезокерамических датчиков приведена на рис. 25.

Подводный акустический гидролокатор и линейки пьезокерамических и температурных датчиков не имели автономного питания; информация с них передавалась на компьютер по кабелю в режиме реального времени.

Рис. 26. Положение гидролокатора на глубине 40 м перед снятием, 13 мая 2023 года



Питание приборов осуществлялось от сети полярной станции.

По результатам анализа отраженных импульсов подводного гидролокатора, задержек сигнала в пьезокерамической линейке и записей температурной линейки будут проведены:

1) исследование нарастания ледяного покрова в зависимости от температурного градиента в толще льда, исследование скорости распространения ультразвука на различных дистанциях в толще льда;

2) исследование коэффициентов отражения и прохождения ультразвука от границ «вода-лед» и «лед-воздух»;

3) оценка точности определения толщины ледяного покрова подводным гидролокатором при наблюдении однолетнего и двухлетнего дрейфующего ледяного покрова.

Регистрация подводным гидролокатором «Трезубец» (рис. 26) была начата 16 февраля. Всего получено

416 Гб информации. 22 марта была начата регистрация линейкой акустических датчиков. Всего получено 330 Гб информации. 13 мая была прекращена регистрация гидролокатором и линейкой из-за потенциальной угрозы потери приборов. Произведен демонтаж этих приборов.

Обработка полученных данных будет проводиться по окончании экспедиции совместно со специалистами Института прикладной физики РАН (Нижний Новгород).

К 10 августа, в связи с подходом НЭС «Академик Трещников» для частичной ротации экипажа и научного состава, а также для ремонта ЛСП «Северный полюс», работы на льду были приостановлены. 21 августа ЛСП «Северный полюс» самостоятельно, без помощи НЭС «Академик Трещников» совершила переход к новой льдине. Начался следующий этап работы экспедиции «Северный полюс-41».

К.В. Фильчук, С.М. Ковалев, Р.Б. Гузенко, С.В. Хотченков, А.Н. Павлов, Л.В. Панов, Ю.Г. Гаврилов, Р.П. Буйнов (АНИИ)

НОВЫЕ ДАННЫЕ О МЕРЗЛОТЕ АРХИПЕЛАГА ЗЕМЛЯ ФРАНЦА-ИОСИФА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЭКСПЕДИЦИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ АНИИ В 2021–2023 ГОДАХ

В геокриологическом отношении Земля Франца-Иосифа, благодаря своей труднодоступности, продолжает оставаться одним из наименее изученных регионов АЗРФ, что предопределяет интерес к постановке специализированных мерзлотных исследований на данном архипелаге. В летние сезоны 2021, 2022 и 2023 годов в районе ОГМС им. Э.Т. Кренкеля (80°37'33,4" с. ш., 58°03'27,64" в. д., 21 м над уровнем моря) на острове Хейса (рис. 1) — самой северной метеостанции в Рос-



Рис. 1. Схема о. Хейса с указанием мест бурения скважин



Рис. 2. Геозлектрический разрез через северо-восточную часть о. Хейса

сии — проводились мерзлотные исследования в рамках гранта РНФ «Геокриологические условия архипелагов и прилегающего шельфа западного сектора Евразийской Арктики», а также по теме ВИП ГЗ «Создание государственной системы мониторинга состояния многолетней мерзлоты на базе наблюдательной сети Росгидромета (ГСМ СММ)». В результате этих работ удалось получить данные о мощности и температуре мерзлой толщи, криогенном строении отложений, сезонно-талом слое (СТС), а главное — заложить государственный пункт наблюдения за состоянием многолетней мерзлоты.

Рекогносцировочные работы по выбору точки бурения термометрической скважины и расположения площадки мониторинга СТС были проведены в июле 2021 года в ходе рейса НЭС «Михаил Сомов» и включали выполнение электроразведочного профиля методом зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБ) южнее оз. Космическое через морские террасы с выходом на припай (рис. 1, 2). По данным ЗСБ, мощность мерзлых пород в районе намеченной точки бурения скважины на сложенных с поверхности песками террасах составляет порядка 100 м.

В августе 2023 года с борта НЭС «Академик Трещников», совершавшего рейс к ЛСП «Северный полюс», вертолетом в намеченную точку бурения на о. Хейса был доставлен отряд мерзлотоведов с буровой установкой УКБ 12/25. В течение недели отряд провел бурение скважины № 1 глубиной 25 м, в которую была

установлена термокоса с автоматическим спутниковым передатчиком данных. Скважина расположена в 350 м от береговой линии на морской террасе высотой около 5 м над уровнем моря (рис. 2). Терраса характеризуется проективным покрытием растительности 15–25 % (мхи, лишайники, полярные маки, злаковые) и разбита повторно-жильными