

ИССЛЕДОВАНИЯ МОРФОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИПАЙНОГО ЛЬДА В ХОДЕ ПОЛЕВОГО ВЫЕЗДА В РАМКАХ КОМПЛЕКСНОЙ ЭКСПЕДИЦИИ РУССКОГО ГЕОГРАФИЧЕСКОГО ОБЩЕСТВА НА О. ЗЕМЛЯ АЛЕКСАНДРЫ АРХИПЕЛАГА ЗЕМЛЯ ФРАНЦА-ИОСИФА

В мае 2023 года в рамках комплексной экспедиции Русского географического общества (РГО) был осуществлен полевой выезд на о. Земля Александры архипелага Земля Франца-Иосифа. В экспедиции участвовали специалисты РГО, национального парка «Русская Арктика», сотрудники Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН (ИФЗ РАН), Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова (ИЗМИРАН), а также Арктического и антарктического научно-исследовательского института (АНИИ). Ученые были доставлены военным транспортным самолетом Ан-26 на аэродром Нагурское на о. Земля Александры и размещены на базе «Омега» национального парка «Русская Арктика». В ходе экспедиции были выполнены следующие исследования: микросейсмическое зондирование для изучения глубинного строения предполагаемых очаговых зон сильных палеоземлетрясений, георадарное профилирование на участках предполагаемых активных разломов, сейсмологические наблюдения группой временных станций (сейсмической микрогруппой), проведение ледового эксперимента по регистрации геоакустических волн на ледяном покрове моря с помощью сейсмической косы, исследование морфометрических характеристик ровного припайного льда и отбор проб на хлорофилл «А», дистанционно-по-

левое геоморфологическое и палеосейсмологическое картирование следов сильных палеоземлетрясений в рельефе и по геофизическим данным. Работы проводились параллельно двумя группами с разными локациями и выполняемыми задачами. Одна из групп осуществляла изыскания на припае, в том числе в составе этой группы научным сотрудником АНИИ были проведены измерения основных морфометрических характеристик ровного припайного льда и снежного покрова для накопления статистики по данному конкретному локальному району и отбор проб на исследование содержания хлорофилла «А».

Выходы на лед осуществлялись дважды на припае в бухте Северная. В рамках этой работы выполнена съемка толщин льда и снега контактным методом на двух ледовых профилях. Измерялись высота снежного покрова, толщина льда, превышение поверхности льда над поверхностью воды в каждой точке профилей (всего 22 точки); выбурены три керна, два из них использовались

для исследования физических свойств льда, все три использовались для отбора проб на хлорофилл «А». Непосредственно на льду производился замер температуры льда, измерение солености проводилось в помещении; дополнительно для оценки содержания хлорофилла «А» были набраны образцы морской воды (всего 3 литра в местах извлечения кернов); измерена соленость по толще кернов, а также профильтрованы образцы растопленного льда и морской воды для получения проб на хлорофилл «А», готовых к дальнейшей обработке в лабораторных условиях.

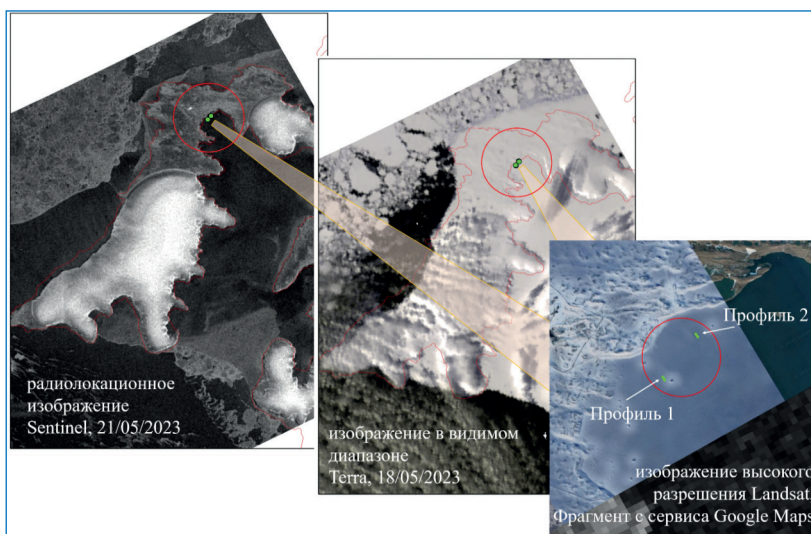
Ледомерная съемка

Всего было выполнено два ледомерных профиля методом контактного бурения и осуществлен отбор трех ледяных кернов. Место работ выбиралось с учетом хозяйственных интересов в данном локальном районе, там, где чаще всего организуется ледовый причал для разгрузки судов, а также с учетом наилучшей пешей доступности при отсутствии возможности использовать снегоход для транспортировки людей и оборудования, приблизительно в 500 м от берега в направлении, перпендикулярном береговой линии. Длина профиля-1 составила 100 м, профиля-2 — 120 м. Замеры морфометрических

характеристик производились с шагом 10 м. Таким образом, на первом профиле было произведено 10 замеров, на втором — 12. Координаты крайних точек обоих профилей зафиксированы. При проведении работ измерялись основные морфометрические характеристики: высота снежного покрова ($H_{сн}$), толщина льда ($H_{л}$) и превышение поверхности льда над поверхностью воды ($\Delta H_{л}$).

В районе базы «Омега» в при-

брежной части бухты Северная наблюдался достаточно ровный припайный лед, без видимых следов активных динамических процессов в виде крупных наслоений и торшаний. Тем не менее под толстым слоем снега были обнаружены как более ровные, так и торосистые участки, которые, очевидно, сформировались еще на ранних этапах становления припая. В зоне видимости находилось несколько обломков и кусков айсбергов, а у берега при выходе на припай в обоих местах, где проводились ледоисследовательские работы, обнаруживалась приливная трещина.



Местоположение ледоисследовательских работ на спутниковых изображениях Sentinel (радиолокационная съемка, 21.05.2023), Terra (видимый диапазон, 18.05.2023), Landsat (фрагмент с сервиса Google Maps)

Средняя толщина льда (H_n) на профиле-1 составила 90 см, на профиле-2 — 100 см. Средняя высота снега ($H_{сн}$) составила 32 см на профиле-1 и 35 см на профиле-2. Измерение превышения поверхности льда над поверхностью воды (ΔH_n) оказалось затруднительным, поскольку собственно превышение было зафиксировано всего в нескольких точках, в пределах 1–2 см. В остальных случаях наблюдался эффект, при котором из только что пробуренной лунки на поверхность льда бурно вырывалась вода, просачиваясь в окружающий снег. К сожалению, после обнаружения этого эффекта, который свидетельствовал о том, что верхняя граница льда находится ниже уровня воды, следовало измерить превышение воды над поверхностью льда. Однако это было невозможно сделать из-за нехватки времени, поскольку для осуществления подобного замера грамотно и методически обоснованно требовалась более серьезная и трудоемкая предварительная подготовка каждой точки, где пробуривалась лунка. Поэтому в этих точках значение ΔH_n условно зафиксировано как 0* см. Схема получившихся ледовых разрезов по выполненным измерениям приведена на рисунке.

Предполагаемая причина того, что верхний уровень льда находился ниже уровня моря, — это большое количество снега на льду, который своей массой придавливает ледяную толщу, в следствие чего возникает прогиб ледяного покрова. Такое явление хорошо известно и весьма подробно описано, в том числе в отчетах по результатам ледоисследовательских работ на НИС «Ледовая база Мыс Баранова». К тому же оно может дополняться следующим: во время прилива через приливную трещину на поверхности льда может нагнетаться морская вода, которая потом за время отлива постепенно распространяется по границе снег–лед и в толще снега по поверхности льда, прогнувшегося под весом снега, а затем промерзает, образуя водно-снежный лед,

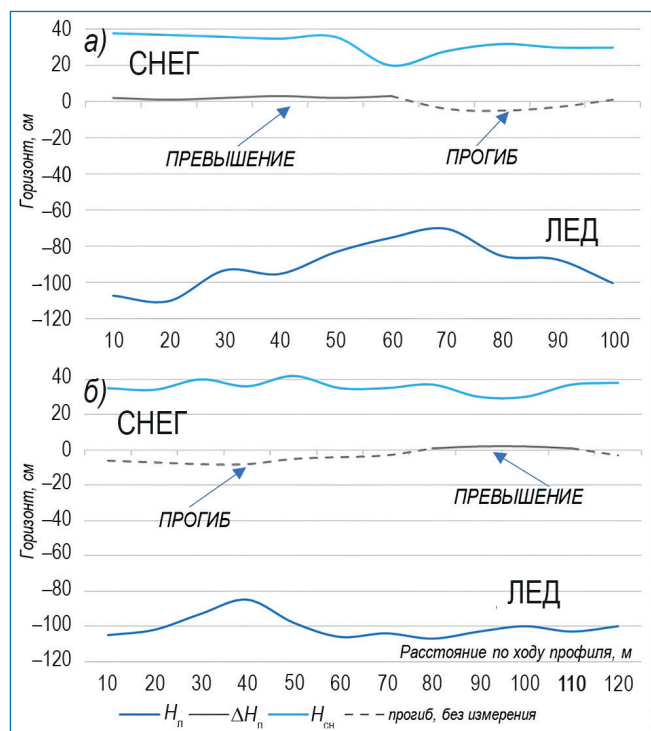
и приращивает толщину льда на верхней границе. Это предположение вполне подтверждается изучением вертикального профиля солёности льда при исследовании физических свойств ледяных кернов.

Эффект прогиба и погружения ледяной толщи также хорошо виден на радиолокационном снимке спутника Sentinel за 21.05.2023. Акватория, покрытая припайным льдом в бухте Северная и окрестностях, на изображении затемнена.

Отбор ледяных кернов и изучение физических свойств льда

После проведения ледемерной съемки при помощи кольцевого бура Черепанова были выпилены ледяные керны диаметром 80 мм. Всего удалось отобрать 3 керна: один на первом профиле и два на втором. По одному керну с каждого профиля были использованы для исследования физических свойств льда. Длина керна-1, отобранного на профиле-1, составила 78 см, длина керна-2, отобранного на профиле-2, составила 82 см, а керна-3, также взятого на профиле-2, — 106 см. Все три использовались для отбора проб на хлорофилл «А».

Непосредственно на льду производился замер температуры льда температурным щупом для построения вертикального профиля по горизонтам через каждые 10 см. Керн, распиленный на горизонты по 10 см, был расфасован в пластиковые пакеты. Все образцы забирались со льда и растапливались в теплом помещении полностью до жидкой фазы. После того как в теплом помещении лед растаял, была замерена солёность талой воды каждого 10-сантиметрового горизонта керна для построения вертикального профиля солёности. Также производились замеры массы и объема для расчета плотности льда (полученное среднее значение $\rho = 860 \text{ кг/м}^3$).



Ледовый разрез на профиле-1 (а) и профиле-2 (б), где: H_n — нижняя граница ледяного покрова, $H_{сн}$ — поверхность снега; ΔH_n — превышение поверхности льда над поверхностью воды (либо прогиб льда, реальные значения не измерены), значение «0» — поверхность воды

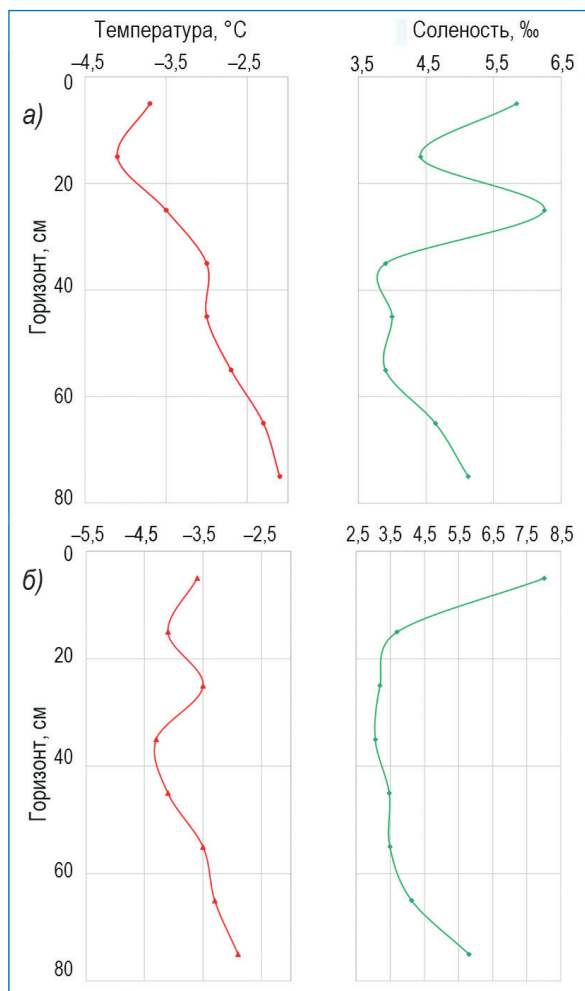


Работа на припае о. Земля Александры. Май 2023 года

Распределение температуры по толщине примерно соответствует линейному, уменьшаясь от минимальных значений на поверхности льда до температуры воды на нижней границе льда (до $-2,1 \text{ }^\circ\text{C}$ и $-2,9 \text{ }^\circ\text{C}$), хотя и испытывая некоторые колебания в толще. При этом разница между максимальным и минимальным значением тем-

пературы составляет всего лишь около двух градусов, что характерно для весеннего периода.

Вертикальное распределение солёности керна-1 имеет змеевидный профиль, а керна-2 — «С»-образный профиль с увеличением значения на верхней и нижней поверхности льда. Это одновременно и демонстрирует неравномерный процесс опреснения верхних слоев льда со стеканием рассола вниз, и может служить подтверждением процессов затока морской воды, ее накопления в прогибе и намерзания нового льда поверх уже сформировавшегося и распресненного, давая всплеск солёности на графике.



Вертикальное распределение температуры и солёности исследованных ледяных кернов: а) — керн 1, профиль 1; б) — керн 2 профиль 2

Оценка содержания хлорофилла «А»

Напиленные нижние 30 см от общей длины кернов помещались в специализированные герметичные пакеты, поскольку именно нижние части льда должны использоваться в отборе проб для оценки содержания хлорофилла «А».

В образовавшихся после извлечения кернов лунках были набраны образцы воды для дальнейшего анализа. Забор воды производился в пластиковые бутылки объемом 1 л, при этом лунки предварительно зачищались от суги, при попадании суги в бутылку она удалялась механическим способом.

Вода, полученная из растаявшего льда нижних 30 см ледяной толщи, была профильтрована при помощи ручного портативного компрессора и фильтра-

ционной установки. Вода с одного керна пропусклась через один фильтр с фиксацией общего профильтрованного объема. Морская вода, набранная в лунке того же керна, фильтровалась в отдельный фильтр также с фиксацией общего объема. Фильтры для сохранения биологического материала складывались пополам (водорослями внутрь), упаковывались в отдельные зип-пакеты и маркировались. Всего профильтровано 3 образца талой воды из трех ледяных кернов и 3 образца морской воды, взятой на анализ в местах отбора кернов. После этого фильтры были заморожены и в таком виде доставлены в лабораторию ААНИИ для дальнейшего анализа.

В итоге было профильтровано 1120 мл талой воды керна 1, 1550 мл из керна 2 и 1420 мл из керна 3, а также около 3 литров морской воды, набранных в местах выпиливания кернов, по 1 л с каждого места для получения 3 образцов для анализа. В лабораторию были доставлены замороженные образцы с отфильтрованными водорослями: 3 из кернов, 3 из воды.

Краткие выводы

Исследования, выполненные на припае в районе базы «Омега» на о. Земля Александры ЗФИ в мае 2023 года, показали:

- средняя толщина ровного припайного льда по результатам выполнения 2 ледемерных профилей составляет 90–100 см;

- средняя высота снега на припае около 35 см, что довольно много и, вероятно, является причиной прогиба ледяного покрова в этом локальном районе ниже уровня моря;

- в местах интенсивного снегонакопления наблюдалось нарастание льда сверху за счет смачивания нижних слоев снега водой и его замерзания. В зависимости от мощности слоя снежно-водного льда происходили изменения в физических свойствах всего ледяного покрова в данном месте;

- измеренные характеристики физических свойств льда подтверждают приведенные выше предположения. Распределение температуры по толщине льда примерно соответствует линейному, а распределение солёности имеет особенность с нестандартным всплеском солёности в верхних горизонтах;

- анализ данных по оценке содержания хлорофилла «А» показывает следующую зависимость: чем дальше от поверхности, тем ниже содержание хлорофилла «А». Тем не менее делать серьезные выводы по нескольким пробам невозможно, поэтому данные пробы и их анализ будут включены в проект, выполняемый в рамках государственного задания.

Авторы выражают благодарность за организацию экспедиции и содействие в проведении работ Руководителю экспедиционного направления РГО Сергею Анатольевичу Чечулину.

*А.Б. Тимофеева (ААНИИ),
Р.А. Жостков (ИФЗ РАН им. О.Ю. Шмидта РАН),
Д.А. Преснов (ИФЗ РАН им. О.Ю. Шмидта РАН),
Р. Н. Вакарчук (ИФЗ РАН им. О.Ю. Шмидта РАН),
А.Н. Овсяченко (ИФЗ РАН им. О.Ю. Шмидта РАН),
И.В. Прокопович (ИЗМИРАН, Троицк).
Фото А.Н. Овсяченко*