

## НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБРАЗОВАНИЕ В ОБЛАСТИ АРКТИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ В УНИВЕРСИТЕТСКОМ ЦЕНТРЕ НА ШПИЦБЕРГЕНЕ

Разведка и добыча полезных ископаемых на шельфе замерзающих морей дали импульс для развития новых технологий, связанных со строительством и эксплуатацией объектов освоения шельфа и береговой инфраструктуры. Таяние арктических льдов, вызванное изменениями климата, привело к повышению навигационной активности и развитию туризма в Арктике. Университетский центр на Шпицбергене (UNIS) создан для подготовки студентов и специалистов, заинтересованных в получении образования и опыта полевых работ в арктических условиях, для проведения научных исследований в Арктике, развития международного научного сотрудничества и поддержания локальной инфраструктуры в поселке Лонгйир, расположенном на Шпицбергене на 78° с.ш. UNIS был организован по решению Норвежского правительства в 1993 году как научно-образовательный центр, управляемый министерством науки и технологий Норвегии и советом, состоящим из представителей университетов Норвегии и местного населения поселка Лонгйир. Структурные подразделения UNIS включают: факультеты арктической биологии, арктической геологии, арктической геофизики и арктических технологий, а также департамент логистики и администрацию. В соответствии с замыслом организаторов примерно 50 % студентов и преподавателей UNIS являются гражданами или учащимися Норвегии, а другие 50 % — гражданами или учащимися других стран. Все студенты UNIS являются студентами других университетов и находятся на Шпицбергене временно.

Регулярное транспортное сообщение между Норвегией и Лонгйиром создает экономически выгодные условия для проведения полевых работ на базе UNIS, в которых участвуют студенты и преподаватели UNIS, а также ученые из других стран. Затраты на проведение полевых работ со студентами включены в бюджет UNIS, участие приглашенных ученых поддерживается проектами различных научных фондов. Бюджет каждого курса лекций предусматривает оплату визитов приглашенных лекторов. Стоимость семестра обучения составляет 300 норвежских крон. Студенты оплачивают проезд на Шпицберген и проживание из своих средств. Бюджет UNIS рассчитан на поддержку 15 аспирантских позиций. Имеется

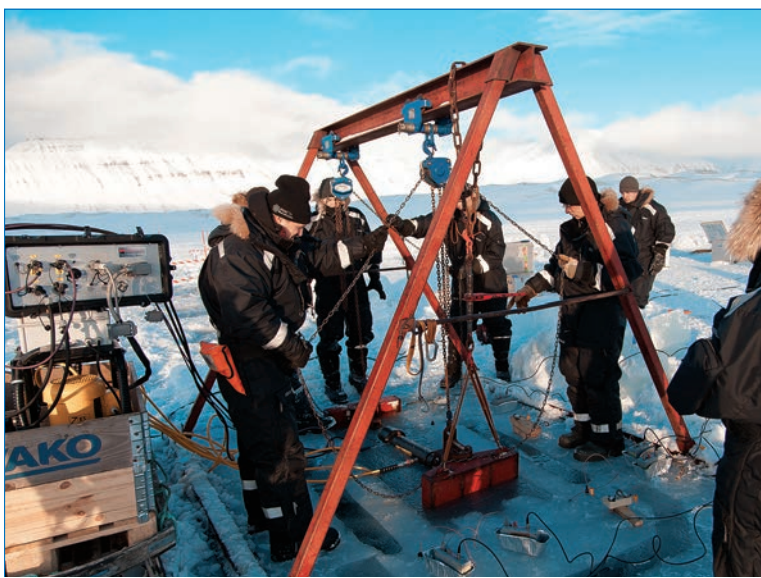
возможность создания аспирантских позиций за счет внешнего финансирования.

Факультет арктических технологий создан в UNIS в 1996 году. На факультете ведутся научные исследования, читаются лекции и проводятся полевые работы в области инженерной геологии, химии окружающей среды, физики и механики льда, прикладной океанографии и гидрологии. В настоящее время штат факультета состоит из трех профессоров, работающих на полной ставке, восьми профессоров, преподающих на 20 % ставки, трех научных сотрудников, работающих на полной ставке по контрактам, и аспирантов.

Я работаю в Университетском центре на Шпицбергене с 2006 года на полной ставке профессора в области физики и механики льда и прикладной океанографии. В мои обязанности входит организация двух курсов (40 %) АТ-211 — «Механика льда, нагрузки на сооружения и измерительная аппаратура» (для бакалавров и магистров) и АТ-332/832 — «Физические нагрузки окружающей среды на арктические береговые и шельфовые сооружения» (для магистров и аспирантов) и научная работа (60 %). Курс АТ-211 проводится с января по июнь и включает лекции, работы в холодной лаборатории, полевые работы на припаяе, полевые работы на дрейфующем льду около борта судна. Курс АТ-332/832 проводится с октября по ноябрь и включает лекции, полевые работы во фьорде, работы в холодной лаборатории и на пресном льду замерзающих озер. Общая оценка студентам за курс складывается из оценки за письменный экзамен (40 %) и оценок за отчеты по лабораторным и полевым работам (60 %). Все полевые работы на моих курсах проводятся совместно с научными исследованиями по проектам. Студенты помогают проводить тесты квалифицированным ученым, приехавшим для полевых исследований на Шпицберген, и имеют возможность работать с современным оборудованием.

Начиная с 2007 года научные исследования в области физики и механики льда, а также прикладной океанографии были поддержаны несколькими проектами Норвежского научного фонда и Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ). В настоящее время наиболее интенсивные

Крупномасштабный тест на прочность льда при растяжении с измерением акустической эмиссии. Ван-Майен-фьорд, март 2016 года. Фото Е. Салганика.



Тест по изгибу консольной балки со смещением вверх конца балки. П.В. Чистяков (МГУ) выполняет контроль эксперимента, на заднем плане студенты курса АТ-211. Ван-Майен-фьорд, март 2016 года. Фото Е. Салганика.



исследования ведутся по проекту “Sustainable Arctic Marine and Coastal Technology” (SAMCoT) (<http://www.ntnu.edu/web/samcot/home>) (2011–2018) в рамках темы (рабочего пакета) “Data collection and process modeling”, проекту “Field studies and modelling of sea state, drift ice, ice actions and methods of icebergs management on the Arctic shelf” (<http://www.unis.no/research/arctic-technology/ice-mechanics/fima/>) (2015–2017) и проекту “Experiments on waves in oil and ice” (<http://www.mn.uio.no/math/english/research/projects/woice/>) (2014–2017). Работы по проекту SAMCoT поддерживаются компаниями, заинтересованными в исследованиях на шельфе Арктики, включая STATOIL, Shell, Total and Exxon.

Проект по исследованию состояния грунта в окрестности берегового примыкания арктического трубопровода был поддержан Газпромом в кооперации с ВНИИГАЗ Газпром и ГОИН (2011–2013 годы). Норвежский центр по международной кооперации в образовании поддержал проект “Safety of Maritime operation and sustainable industrial development in the Arctic” по кооперации с российскими университетами (МГУ, МФТИ, СПбГПУ, СПбГМУ) (2012–2015 годы) (<http://www.unis.no/research/arctic-technology/ice-mechanics/smida-project-page/>) и проект “Safety of industrial development and transportation routes in the Arctic” (<http://www.unis.no/research/arctic-technology/ice-mechanics/sitra-project-page/>) по многонациональной образовательной кооперации между Норвежскими университетами (UNIS, NTNU: Norwegian University of Science and Technology in Trondheim), Канадским университетом (Memorial University Newfoundland), университетами США (Dartmouth College and University Alaska Fairbanks) и российскими университетами (МФТИ, МГУ, СПбГМУ) (2015–2018 годы). Проект по исследованию воздействий льда на плавающий причал в Лонгйире выполнялся в сотрудничестве с капитаном порта в Лонгйире (2011 год). Проект по исследованию воздействий льда на стационарный угольный причал на мысе Капп (поселок Свеа) выполнялся в сотрудничестве с администрацией угольной компании Стуре Ношке (2013–2015 годы). Проект по измерению течений в судоходном проливе Аксельсундет выполнялся в сотрудничестве с капитаном порта в Свеа (2015–2016 годы).

Выполнение большого количества проектов, в которых я являюсь научным руководителем проекта или части проекта, стало возможным благодаря кооперации с российскими учеными, принимавшими участие в разработке нового оборудования и регулярно участвующими в полевых работах и чтении лекций. Среди них необходимо отметить Е.Б. Карулина, М.М. Карулину, В.В. Горбачего (Крыловский государственный научный центр), Е.Г. Морозова (ИО РАН), А.Н. Сахарова, П.В. Чистякова (МГУ, механико-математический факультет), П.В. Богородского, К.В. Фильчука (АНИИ), Д.А. Онищенко (ВНИИГАЗ Газпром), Н.К. Васильева (ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева). Работа по поддержке интернет-сайтов проектов, сохранению данных

Мелкомасштабный тест на растяжение ледяного керна. А.В. Марченко (UNIS) со студентами. Ван-Майен-фьорд, март 2016 года. Фото Е. Салганика.



в геоинформационной системе и администрированию выполняется сотрудницей факультета арктических технологий UNIS Н.А. Марченко.

Начиная с 2006 года на факультете арктических технологий прошли обучение студенты различных высших учебных заведений России: СПбГПУ (52 чел.), МФТИ (44 чел.), МГУ (16 чел.) и СПбГМУ (9 чел.). С 2007 года магистерские проекты в UNIS выполнили 15 российских студентов вышеперечисленных вузов, шесть студентов были приняты в аспирантуру UNIS и NTNU. Бывшие студенты А. Шестов, С. Сухоруков и Р. Юльметов уже защитили PhD диссертации и работают по специальности в UNIS (Лонгйеарбюен, Норвегия), Kvaerner (Осло, Норвегия) и C-Card (С.-Джонс, Канада).

### Научная деятельность

В области микромеханики и термодинамики морского льда и мерзлых грунтов была проведена серия лабораторных экспериментов по термическому расширению образцов, подверженных циклическим изменениям температуры. Работы по термическому расширению льда проводились мной в кооперации с Бенном Лишманом (University College London) (2012–2015 годы). Работы по термическому расширению льда проводятся мной в кооперации с Н.К. Васильевым (ВНИИГ) (2016–2017 годы). В 2014 году по этой теме защитился магистр СПбГПУ И.И. Константинов. Сейчас по этой теме работает аспирант ВНИИГ Ю.Г. Кондрашев и магистр СПбГПУ А.А. Нестеров. Регистрация изменения линейных размеров образцов и их температуры проводилась с помощью оптоволоконных датчиков, использующих эффект Брэгговского отражения светового сигнала. При медленном изменении температуры с периодом 6–12 часов были зарегистрированы эффекты гистерезиса и изменения знака коэффициента термического расширения соленого льда и грунтов, зависящие от их температуры, солености и состава. При быстрых изменениях температуры с амплитудой 1–2 °C в окрестности среднего значения и периодом порядка 10 минут были зарегистрированы поверхностные колебания образцов (термо-упругие волны) с амплитудой, зависящей от их средней температуры. Было обнаружено, что амплитуда термо-упругих волн в соленом льду увеличивается при увеличении средней температуры образца. Обнаруженные эффекты использованы для валидации термо-механической модели соленого льда, включающего жидкий рассол в виде замкнутых ячеек и в виде проникаемых каналов. На основе экспериментальных данных получены зависимости содержания рассола в ячейках и каналах от температуры и солености льда (Marchenko A., Lishman B. The influence of closed brine pockets and permeable brine channels on the thermo-elastic properties of saline ice // Phil. Trans. Royal. Soc. A. Vol. 375. Issue 2086. P. 1–21. ID 20150351).

Влияние миграции рассола на изменение температуры и термическое расширение льда необходимо учитывать при расчете давления льда, находящегося в стесненных условиях, на стенки сооружений. Эта тема стала частью проекта аспиранта UNIS Д. Врангборга и магистра МФТИ, выполнявшего дипломный проект в UNIS, Д.М. Мурашкина. Были исследованы нагрузки льда на стенки коффердама стационарного причала, расположенного на мысе Капп (поселок Свеа, Ван-Майен-фьорд). Установлено, что за время эксплуатации причала с 2000 года стенки коффердама выгнулись так, что их максимальные смещения относительно первоначального положения достигли 1 м. Для измерения ледовых нагрузок на стенках коффердама были установлены мембранные датчики давления. Термокосы регистрировали профиль температуры внутри льда и в воде.

Обнаружено, что лед внутри коффердама примерзает к его стенкам. При этом его толщина достигает 2–3 м, в то вре-

мя как толщина плавающего льда около причала не превышает 80 см. При приливе давление подо льдом внутри коффердама повышается и рассол морской воды выдавливается на поверхность льда. При этом регистрируется незначительное повышение температуры льда. При отливе остатки рассола стекают вниз, а часть рассола замерзает на поверхности льда. В результате лед внутри коффердама растет и снизу и сверху. Датчики зарегистрировали давление на стенки коффердама, изменяющееся синхронно с полусуточным приливом. Максимальные амплитуды давления до 0,5 МПа регистрировались в апреле и мае, когда температура воздуха была выше  $-10^{\circ}\text{C}$ . Эффект повышения давления льда на стенки при вертикальной миграции рассола подтвержден в экспериментах в ледовом бассейне, где давление создавалось наддуванием погруженного в воду баллона (Marchenko A. et al. Thermal expansion measurements in fresh and saline ice using fiber optic strain gauges and multipoint temperature sensors based on bragg gratings // J. Sensors. 2016. Vol. 2016. P. 1–13. ID 5678193). Теоретические исследования также подтверждают увеличение абсолютного значения коэффициента термического расширения соленого льда в области высоких температур.

В области механики льда проведена серия тестов по изменению прочности льда на сжатие, растяжение и изгиб, а также тесты по внедрению в лед цилиндрического индентора. Тесты на сжатие и растяжение проведены с использованием гидравлического пресса с усилием прессования 60 т, позволяющего прикладывать нагрузку по всей толщине плавающего ледяного покрова. Пресс оборудован датчиками, измеряющими нагрузку и смещение на каждом из двух гидравлических цилиндров, использующихся для приведения пресса в действие. Пресс управляется с помощью системного блока, позволяющего проводить работы в полевых условиях (Карулин Е.Б. и др. Испытания морского льда на сжатие путем внедрения полуцилиндрического индентора в ледяной покров. Численное моделирование процесса // Труды ГИИ. 2015. Вып. 86 (370). С. 75–86). Частота записи данных 50–100 Гц. Тесты на изгиб плавающих консольных балок проводятся с использованием рамы, оборудованной гидравлическим цилиндром с усилием прессования 15 т и датчиком нагрузки. Измерения смещения проводятся с помощью датчика, закрепленного на независимой раме. Параллельно с крупномасштабными тестами проводятся мелкомасштабные тесты на прочность при одноосевом сжатии и растяжении кернов льда. Все тесты проводились в ежегодных экспедициях на припае фьордов Шпицбергена и на дрейфующем льду в северо-западном районе Баренцева моря начиная с 2009 года. Были получены масштабные эффекты снижения прочности льда на сжатие и растяжение, полученной в крупномасштабных тестах, по сравнению с прочностью, полученной в мелкомасштабных тестах. Тесты на изгиб показали значения изгибной прочности, аналогичные изгибной прочности, полученной в экспедициях ААНИИ в восточном и юго-восточном районах Баренцева моря. Была получена зависимость эффективного упругого модуля изгиба от содержания жидкого рассола в морском льду. Результаты исследований опубликованы в Трудах Крыловского научного центра и Трудах международных научных конференций POAC (2013) и IAHN Ice Symposium (2014, 2016).

Проведена серия крупномасштабных тестов по изгибу плавающих балок с фиксированными краями. При боковом нагружении было обнаружено, что разрушение длинных балок происходит в два этапа: вначале образуются центральная и две концевые трещины, которые не проходят через всю толщину балки, а потом балка разрушается сжатием в центральной части. Разрушение коротких балок происходит вследствие образования диагональных трещин. Из тестов с длинными балками определяются сразу два значения прочности

на изгиб и на сжатие. Их отношение является характеристикой ледяного покрова и может использоваться при сопоставлении свойств реального и моделированного льда, использующегося в ледовых бассейнах. Результаты исследований опубликованы в Трудах международных научных конференций POAC (2015) и IAHN Ice Symposium (2014, 2016).

Проведены исследования свойств морской воды около фронта выводного ледника Паула в Ван-Майен-фьорде. Средняя глубина моря вдоль фронта ледника составляет порядка 10–15 м. При этом в некоторых местах имеются каньоны глубиной до 20 м, а в некоторых местах морской лед сидит на грунте. Максимальная высота ледника над уровнем моря достигает 40 м. В течение нескольких лет проводились систематические измерения профилей температуры и солёности морской воды, а также скоростей течений воды около фронта ледника. Одновременно измерялись положение фронта ледника, глубина моря, толщина морского льда около фронта ледника, его температура и солёность. Было обнаружено, что фронт ледника отступает на 100–200 м в год. Толщина морского льда на расстоянии до 200–300 м от стенки ледника примерно на 0,5 м больше толщины льда во фьорде. Плавающий лед вблизи ледника практически пресный. Солёность морской воды подо льдом пониженная, и до глубины 4 м вода может находиться в переохлажденном состоянии. Зондирование водной толщи прибором SBE-19 показало, что переохлаждение достигает  $0,3^{\circ}\text{C}$ . Эффект переохлаждения связан с истеканием пресной воды из-под ложа ледника. Пресная вода, находящаяся в точке замерзания при  $0^{\circ}\text{C}$ , переохлаждается при смешении с морской водой, находящейся в точке замерзания в пределах от  $-1,8$  до  $-1,9^{\circ}\text{C}$ . Постепенно замерзая, она приводит к увеличению толщины льда вблизи стенки ледника. Результаты исследований опубликованы (Морозов Е.Г. и др. Переохлажденная вода около фронта ледника на Шпицбергене // Физика атмосферы и океана. 2015. Т. 51. № 2. С. 1–5).

Эффект переохлаждения и замерзания талой воды при смешении с холодной морской водой имеет значение для консолидации плавающих торосов в весеннее и летнее время, когда они попадают в зоны влияния впадающих в море рек. Консолидация килей торосов возможна при попадании внутрь килия распресненной воды, образующейся вследствие таяния килия под воздействием потока тепла из океана. Исследование и моделирование термодинамической консолидации торосов и воздействия килей торосов на морское дно составляет одно из направлений научной деятельности на факультете арктических технологий (см., например, Shestov A.S., Marchenko A.V. Thermodynamic consolidation of ice ridge keels in water at varying freezing points // Cold Regions Science and Technology. 2016. Vol. 121. P. 71–79).

Проведены исследования дрейфа льда и айсбергов в районе Шпицбергена. На дрейфующий лед устанавливались буи Oceanic Measurements, передающие по системе связи Ири-

Перед началом работ около стенки ледника Паула.  
Н.А. Марченко (UNIS), И.В. Рыжов (ААНИИ), К.В. Фильчук (ААНИИ),  
Е.Г. Морозов (ИО РАН), П.В. Богородский (ААНИИ). Фото А.В. Марченко.



дум данные об их положении, скорости ветра и температуре льда каждые 10 минут. Полученные данные использовались для расчета экстремальных скоростей дрейфа льда, которые в некоторых районах достигают 1,5 м/с. Вращение дрейфующих айсбергов относительно вертикальной оси было обнаружено при анализе данных буев, установленных попарно на айсберги в Гренландском море (*Yulmetov R. et al. Iceberg and sea ice drift tracking and analysis off north-east Greenland // Ocean Engineering. 2016. Vol. 123. P. 223–237*), и при визуальном наблюдении с помощью двух фотокамер в Адвент-фьорде. Модель вращения дрейфующих айсбергов основана на уравнениях Кирхгофа, описывающих движение твердого тела в идеальной жидкости и дополненных силами сопротивления движению воды и воздуха (*Марченко А.В. Влияние эффекта присоединенных масс на дрейф и буксировку айсбергов // Труды КГНЦ. 2015. Вып. 86 (370). С. 101–116*). Результаты расчетов показали хорошее совпадение с экспериментальными данными, полученными с дрейфующих айсбергов Гренландского моря, на которых было установлено по два буя.

На факультете также ведутся работы по моделированию буксировки айсбергов и маневрированию заякоренного судна в ледовых условиях (*Онищенко Д.А., Марченко А.В. Моделирование разворота на месте плавучего сооружения судового типа с внутренней турелью в условиях сплоченного ледяного покрова // Вести газовой науки. 2015. № 2. С. 124–132*). В области прикладной океанографии проводятся регулярные измерения характеристик погранслоя в слое воды под дрейфующим ледяным покровом Баренцева моря. Данные используются для расчета теплового потока из океана, напряжений трения на нижней поверхности ледяного покрова и характеристик волн, проникающих под ледяной покров из свободных ото льда областей моря (*Collins C.O. et al. In situ measurements of an energetic waves event in the Arctic marginal ice zone // Geoph. Res. Letters. Vol. 42. № 6. P. 1863–1870*). Проведено исследование характеристик приливов во фьордах западного Шпиц-

бергена включая измерение высоты приливов в различных местах Ис-фьорда и Ван-Майен-фьорда и измерение приливных течений. Проведено исследование скоростей приливных течений в навигационном проливе Акселсунда (*Kowalik Z. et al. Tidal currents in the western Svalbard Fjords // Oceanologia. 2015. Vol. 57. № 4. P. 318–327*).

### Заключение

Снижение активности норвежской угледобывающей компании Стуре Ношке увеличило значимость UNIS в поддержке жизни в поселке Лонгйир. Профиль поселка постепенно меняется от индустриального к университетско-туристическому поселению. В соответствии со своими целями UNIS будет поддерживать кооперацию с российскими учеными и проезд российских студентов для обучения на Шпицбергене. Некоторые полевые и лабораторные работы, а также лекции будут проводиться в поселках Баренцбург и Пирамида по согласованию с администрацией треста «Арктикуголь» и Российского научного центра на Шпицбергене. Вместе с тем проведение научных работ по исследованию свойств морского льда наиболее удобно вблизи поселка Свеа, где ледяной покров наиболее стабильный и по свойствам практически аналогичен ледяному покрову Баренцева моря. Имеющаяся инфраструктура и доступный транспорт для доставки людей и оборудования к месту полевых работ создают уникальные условия для развития стабильной кооперации российских и зарубежных ученых в области арктических технологий, а также обучения российских студентов в международном коллективе. Развитие взаимодействия и обмена опытом научных школ России и Норвегии способствует улучшению взаимопонимания и ответственности за индустриальное развитие как Баренцева моря, так и Арктического региона в целом.

*А.В. Марченко*

*(Университетский центр на Шпицбергене, ГОИН РФО)*

## ПРАКТИКА СТУДЕНТОВ НОРВЕЖСКОГО УНИВЕРСИТЕТСКОГО ЦЕНТРА В РОССИЙСКОМ НАУЧНОМ ЦЕНТРЕ НА АРХИПЕЛАГЕ ШПИЦБЕРГЕН

В Российском научном центре на архипелаге Шпицберген в пос. Баренцбург на базе химико-аналитической лаборатории в период с 23 по 27 января 2017 года проходила лабораторно-полевая практика студентов норвежского Университетского центра на Шпицбергене (The University Centre in Svalbard – UNIS, далее — ЮНИС).

Практика проводилась в рамках курса ЮНИС для магистров и аспирантов по развитию методов исследования загрязнения окружающей среды «Техники детектирования органико-химических загрязняющих веществ в арктических условиях» (курс A324/A824).

Программа практики включала отбор проб разных сред и их первичную обработку в лаборатории для последующего анализа на стойкие органические загрязнители (пестициды, полихлорированные бифенилы, замедлители горения) с целью определения вклада локальных источников и глобального переноса в суммарное загрязнение на Шпицбергене. В занятиях принимали участие восемь студентов-магистрантов ЮНИС, приехавших из Норвегии, Финляндии, Чехии, Германии, Англии и США, а также два ассистента: д-ра Анне Карине Хальсе и Иньред Крогсет. Руководитель практики — профессор Роланд Калленборн. К лабораторным и лекционным заня-

тиям также присоединилась новая сотрудница химико-аналитической лаборатории в Баренцбурге, недавняя выпускница СПбГУ Анна Козлова.

Во время практики студенты освоили методы отбора и методику обработки образцов снега, атмосферного воздуха, донных отложений и морской биоты. Пробы отбирались в окрестностях Баренцбурга и на берегу Гренфьорда. Помимо полевых выездов и практических занятий в лаборатории, студенты прослушали лекции курса по методологии определения содержания стойких органических соединений и научные доклады по свойствам «новых» загрязнителей, новейшим методам пассивного пробоотбора, а также о новейших результатах исследований, ведущихся на архипелаге российскими учеными.

Зимовочным составом Российской научной арктической экспедиции на архипелаге Шпицберген (РАЭ-Ш; начальник — Глеб Тарасов) была оказана значительная помощь в проведении практики: организованы выезды на снегоходах для отбора проб, предоставлено лабораторное оборудование и химическая посуда, обеспечена комфортная работа в лаборатории и проведение лекционных занятий в конференц-зале научного центра, оперативно решались повседневные технические и