

ОБ ОРГАНИЗАЦИИ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА МНОГОЛЕТНЕЙ МЕРЗЛОТЫ ВЫСОКОШИРОТНОЙ АРКТИКИ ПО ТРАНСЕКТЕ АРХ. ШПИЦБЕРГЕН — О. ВРАНГЕЛЯ

В мае 2024 года специалистами ГНЦ АНИИ была пробурена термометрическая скважина Государственной системы фонового мониторинга состояния многолетней мерзлоты (ГСМ СММ) на острове Врангеля. С учетом проводившихся в последние годы работ на архипелагах Шпицберген, Земля Франца-Иосифа, на острове Визе, архипелагах Северная Земля и Новосибирские острова можно говорить о появлении наблюдательной мерзлотной трансекты, пересекающей всю евразийскую часть высокоширотной Арктики. В данной заметке рассказывается о ходе этих работ, специфике логистического обеспечения мерзлотных исследований в Арктике, а также о первых научных результатах исследований.

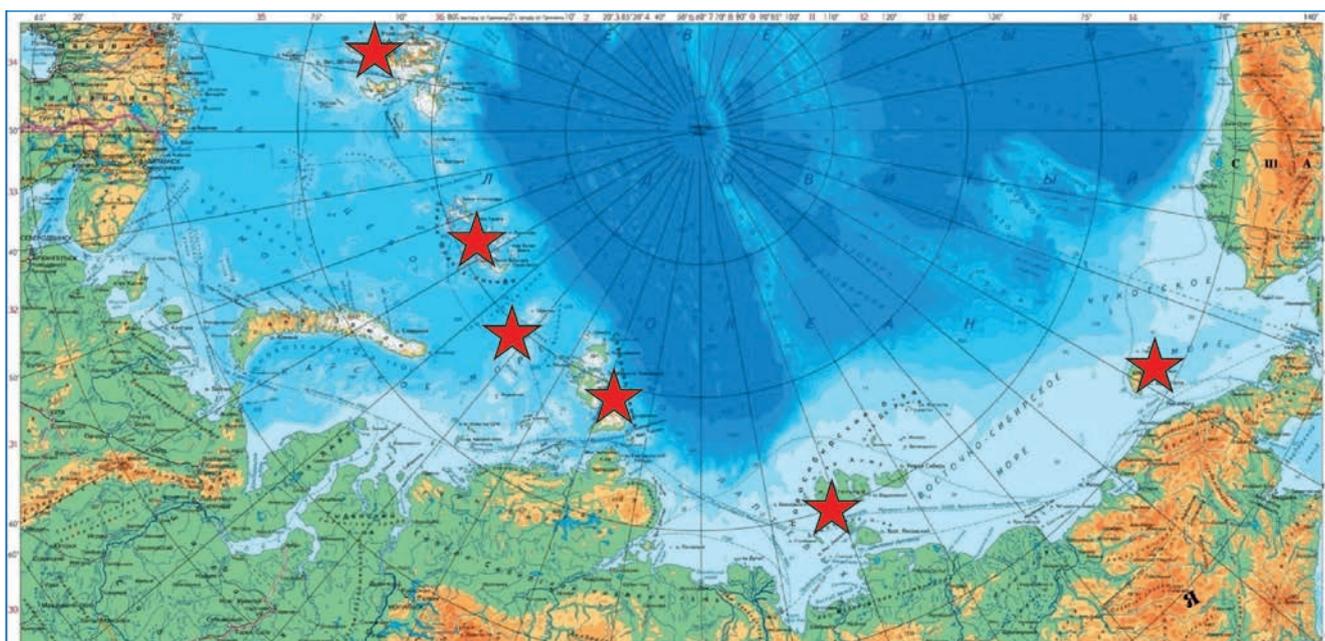
Архипелаг Шпицберген. Начало планомерным работам АНИИ по изучению и мониторингу мерзлоты островной Арктики было положено на Шпицбергене. В сезонных работах Российской научной арктической экспедиции на архипелаге Шпицберген (РАЭ-Ш) с 2016 года участвует отряд мерзлотоведов. Основная задача состоит в формировании в составе общей системы наблюдений за криосферой Шпицбергена мерзлотного полигона, на котором отслеживается динамика температурного режима мерзлых пород. Хорошо себя зарекомендовала практика проведения работ в два этапа: в зимне-весеннее время, когда без ущерба почвенно-растительному покрову можно транспортировать снегоходами малогабаритную установку, бурятся скважины, а в летне-осенний период проводятся измерения температуры и снимаются данные с установленных автоматических логгеров. Использование снегоходов позволило охватить зону радиусом до 50 км от базы в поселке Баренцбург. В поселок Пирамида

доставка людей и грузов осуществляется с использованием транспортных средств треста «Арктикуголь», туристических рейсов или арендованных маломерных судов. В марте 2021 года удалось совместить океанологические исследования в Билле-фьорде с доставкой и выброской отряда мерзлотоведов на Пирамиду. При этом маломерное судно подходило к кромке припая, и после замеров толщины льда производилась выгрузка снегоходов и оборудования.

Температура пород отслеживается в 16 оборудованных термометрических скважинах в районе Баренцбурга и Пирамиды. Ежегодно в конце теплого периода измеряется мощность сезонно-талого слоя (СТС) на площадке мониторинга, организованной по международному стандарту программы Circumpolar Activelayer Monitoring (CALM). В 2019 и 2020 годах в рамках грантов Svalbard Strategic Grant полученные российской стороной данные мониторинга обобщались вместе с данными мониторинга мерзлых пород в других районах Шпицбергена норвежскими, немецкими, итальянскими и польскими учеными и публиковались в годовых отчетах "The State of Environmental Science in Svalbard". Норвежские и российские специалисты обменивались визитами в Баренцбург и Лонгйир в целях совершенствования методик бурения мерзлых пород.

Помимо решения основной задачи организации мониторинга состояния мерзлоты, на архипелаге активно изучались криогенные явления. Впервые на Шпицбергене удалось выполнить сквозное бурение ряда гидролаколитов и сделать выводы об их природе. Сотрудником Центра мониторинга состояния многолетней мерзлоты В.Э. Демидовым на эту тему подготовлена кандидатская

Расположение пунктов мониторинга мерзлоты в Евразийском секторе высокоширотной Арктики, обустроенных АНИИ в 2016–2024 годах





Бурение скважины на гидролакколите Нори в долине Грёндален (арх. Шпицберген)

диссертация «Формирование и современная динамика гидролакколитов архипелага Шпицберген».

Наличие в составе РАЭ-Ш химико-аналитической лаборатории в Баренцбурге позволило оперативно выполнять детальное изучение химического состава надмерзлотных, подмерзлотных и внутримерзлотных вод, а также водной вытяжки из мерзлых пород непосредственно на архипелаге без вывоза образцов на материк. С помощью электроразведки были оконтурены криопэги. Их наличие впоследствии было подтверждено бурением. Комплексно изучена специфика биогеохимии мерзлых пород Шпицбергена. Эти работы включали микробиологический анализ, определение содержания газов, углерода и ртути. В обработке данных и подготовке научных публикаций по Шпицбергену активное участие принимали С. Веттерих и Л. Ширрмейстер из Центра полярных и морских исследований им. Гельмгольца (Институт им. Альфреда Вегенера, AWI, г. Потсдам, Германия).

По соглашению с оператором российских поселков на Шпицбергене трестом «Арктиуголь» начат геотехнический мониторинг температурного состояния грунтов оснований зданий. Базируясь на результатах термометрических наблюдений в скважинах и трендах роста среднегодовой температуры воздуха сделан прогноз о вероятном начале опускания кровли многолетней мерзлоты в ближайшие 30 лет. Совместно с специалистами ООО «МГУ-геофизика» выполнялись геофизические работы по картированию таликовых зон и субмаринной мерзлоты, а в 2021 году в рамках опытно-методических работ по подготовке проекта ГСМ СММ в долине Грёнда-

лен была пробурена и впервые в практике отечественных исследований оборудована термокозой со спутниковым передатчиком данных тестовая скважина глубиной 25 м.

Архипелаг Северная Земля. В 2019 году ААНИИ был выделен грант РНФ «Геокриологические условия архипелагов и прилегающего шельфа западного сектора Евразийской Арктики» (руководитель — научный сотрудник отдела географии полярных стран Н.Э. Демидов), что позволило расширить географию работ и «перекинуть мост» от Шпицбергена к исследованию Земли Франца-Иосифа и Северной Земли. В задачи гранта входила в том числе отработка технологий мониторинга криолитозоны РФ. В целях изучения мерзлотных условий Северной Земли и закладки здесь пункта геокриологического мониторинга на севере о. Большевик с научно-исследовательского стационара «Ледовая база Мыс Баранова» проведены сезонные работы в составе Высокоширотной арктической экспедиции (ВАЭ) в апреле–мае 2021 года. Доставка на о. Большевик осуществлялась вертолетом из пос. Хатанга. Для бурения в устьевой зоне р. Новая, как и на Шпицбергене, использовалась малогабаритная установка, транспортируемая на снегоходах. Отряд из трех человек при этом ночевал в балке на р. Базовая. Бурение скважин в ближайших окрестностях «Ледовой базы Мыс Баранова» осуществлялось установкой, смонтированной на базе трактора на колесном шасси. Пробуренные скважины позволили впервые определить температурный режим мерзлых пород архипелага. Кроме того, по кернам была сделана

Президент международной ассоциации мерзлотоведения (IPA)

Х. Кристенсен, Г. Гилберт и Н. Демидов обмениваются опытом

применения различных видов буровых коронок для проходки мерзлых пород в университете UNIS, Лонгйир



Бурение скважины в устьевой зоне р. Новая (арх. Северная Земля)





Наледный бугор — блистер в устьевой зоне р. Новая (арх. Северная Земля)

характеристика криолитологического строения морских, аллювиальных и элювиальных отложений. Одна из скважин бурилась с припайного льда и под толщей морской воды вскрыла донные льдосодержащие грунты.

Маршрутные исследования на снегоходах проводились в радиусе 50 км. Их интересным результатом стало обнаружение наледных бугров — блистеров с газонасыщенным рассолом. Криопэги из наледных бугров имели хлоридно-кальциевый и сульфатный магниевый-кальциевый состав. Образование блистеров и криопэгов связано с промерзанием подрусловых таликов в замкнутой системе. Кроме того, проведен отбор повторно-жильных льдов (ПЖЛ), образующих полигоны на морских террасах. На западном берегу залива Микояна на морской террасе была размечена площадка мониторинга СТС, на которой с осени 2021 года в конце теплого сезона сотрудники ВАЭ производят съем данных.

Архипелаг Земля Франца-Иосифа. В июне 2021 года в ходе рейса НЭС «Михаил Сомов» Северного УГМС, совершавшего обеспечение станций в западном секторе Арктики, совмещенное с работами Арктического плавучего университета, были выполнены рекогносцировочные работы по определению точек бурения термометрических скважин и мест расположения площадок мониторинга СТС на архипелаге Земля Франца-Иосифа на островах Хейса, Гуккера, Алджер и Белл. Оптимальное место для пункта геокриологического мониторинга было выбрано рядом с ОГМС им. Э.Т. Кренкеля на о. Хейса. Здесь на террасе, сложенной морскими песками, была заложена площадка, на которой по договору с Северным УГМС в 2021 и 2022 годах сотрудниками обсерватории выполнялись измерения СТС. Согласно данным электро-разведочного профиля мощность многолетнемерзлых пород составляет здесь около 100 м.

В 2022 году ААНИИ был определен исполнителем масштабного проекта создания Государственной системы фоновго мониторинга состояния многолетней мерзлоты (ГСМ СММ). При разработке РД 52.17.925–2023 «Руководство по организации и осуществлению государственного фоновго мониторинга состояния многолетней мерзлоты» был учтен опыт, полученный ранее на Шпицбергене и Северной Земле. Проект предусматривает создание 140 пунктов мониторинга на территории Российской Федерации. Каждый пункт мониторинга оборудуется термометрической скважиной. Часть скважин, в высокоширотной Арктике, ААНИИ выполняет собственными силами, остальные — с привлечением сторонних организаций.



НЭС «Академик Трёшников» в проливах Земли Франца-Иосифа

Интересная в логистическом отношении операция по организации бурения термометрической скважины была проведена в августе 2023 года на о. Хейса. Дрейфующая станция «Северный полюс-41» в это время находилась к северу от Земли Франца-Иосифа, и к ней направлялась НЭС «Академик Трёшников» с целью снабжения и ротации персонала. В институте было принято решение использовать рейс судна в том числе и для доставки и вывоза отряда мерзлотоведов на арктические острова.

Когда 9 августа НЭС «Академик Трёшников» подошло к архипелагу с юга, сквозной проход через проливы был невозможен, и вертолет доставил отряд из трех человек на полярную станцию ОГМС им. Э.Т. Кренкеля с расстояния более 200 км. На подлете к станции вертолет совершил посадку в выбранной в 2021 году точке, где была выгружена буровая установка. После завершения заброски отряда вертолет нагнал НЭС «Академик Трёшников», которое, не останавливаясь, продолжало огибать с запада Землю Франца-Иосифа. 23 августа по возвращении от дрейфующей станции ледовая обстановка дала судну возможность пройти с севера сквозь архипелаг Британским каналом и забрать отряд вертолетом с небольшого удаления. За это время по стандартам РД 52.17.925–2023 были обустроены термометрическая скважина глубиной 25 м, вскрывшая разрез засоленных морских песков и суглинков, и площадка мониторинга СТС. Удалось также провести бурение дополнительной скважины и обнаружить в ней криопэг, а в ходе маршрутных исследований отобрать образцы ПЖЛ. Уже утром 24 августа НЭС «Академик Трёшников», завершив переход в 400 км к находящемуся на полпути между Землей Франца-Иосифа и Северной Землей о. Визе, провело вертолетную заброску мерзлотоведов на этот остров.

Остров Визе. Несмотря на небольшие размеры острова — длина около 35 км, — интерес к организации здесь пункта ГСМ СММ был связан с тем, что на острове работает одна из немногих в Арктике метеостанций Росгидромета, где с советского времени ведутся наблюдения за температурой почвогрунтов вытяжными термометрами (одним из критериев при выборе мест расположения пунктов ГСМ СММ является приемственность с сетью станций, выполнявших данный вид наблюдений). Кроме того, остров до сих пор остается слабоизученным даже в общегеографическом плане. Факт неоднократного переноса метеоплощадки вследствие размыва берега говорил о сложности острова рыхлыми породами, подверженными активной термоабразии. Де-



А.В. Гузева завершает установку термоксы со спутниковым передатчиком в скважине на о. Визе

тальное обследование береговых обнажений высотой 8–10 м показало, что в толщах мерзлых нижнемеловых горизонтально-слоистых песков встречаются стяжения сферической формы до 3–4 м в диаметре, а также протяженные пласты мощностью 0,2–0,8 м известково-кремнистых песчаников. Пляжи слагаются галькой этих плотных пород. На поверхности можно наблюдать россыпи каменного материала, выпученного мерзлотой. Со второй попытки (первая скважина уперлась в скальный грунт на глубине около 4 м) была пробурена термометрическая скважина глубиной 25 м по пескам с массивной криотекстурой. На ровной поверхности без каменного материала размечена площадка мониторинга СТС. В обнажениях и шурфах были исследованы и отобраны образцы ПЖЛ. Несмотря на то, что обрывы с ледяными жилами на о. Визе во многом напоминают классические плейстоценовые обнажения с остатками мамонтовой фауны, здесь мы имеем дело с так называемыми эпигенетически промерзшими отложениями. Сами осадки образовались около 100 млн лет назад в эпоху с теплым

Повторно-жильный лед в обнажении на о. Визе (см. геологический молоток для масштаба)



Н.Э. Демидов с образцом окаменевшего дерева из отложений нижнего мела на о. Визе

климатом, о чем говорят многочисленные находки окаменелых и обугленных деревьев, а промерзание с образованием ПЖЛ произошло значительно позже.

Архипелаг Новосибирские острова. В августе 2023 года НЭС «Михаил Сомов» встало на незапланированный ремонт, и функции снабженческого рейса по полярным станциям легли на НЭС «Академик Трёшников». Было принято оперативное решение использовать этот рейс для организации еще одного пункта мониторинга и перебазировать отряд мерзловедов с о. Визе на Новосибирские острова. На этом архипелаге есть три действующие метеорологические станции: АЭ Котельный, МГ-2 Пролив Санникова и МГ-2 Кигилях. Необходимо было выбрать для работ одну из них с точки зрения пригодности для расположения здесь пункта мониторинга мерзлоты. Помимо анализа картографического материала и космоснимков в этом вопросе в некоторой степени помогла книга А.Ф. Трёшникова «Мои полярные путешествия», хранящаяся в судовой библиотеке. А.Ф. Трёшников перед войной участвовал в экспедиции Арктического института,

Образованные мерзлотой конические холмы — байджарахи. Строения на заднем плане — метеостанция МГ-2 Пролив Санникова (о. Котельный, арх. Новосибирские острова)



которая занималась работами на Новосибирских островах и в том числе проводила поиск оптимальных мест для новых метеорологических станций. Достаточно подробно в книге были описаны и условия в районе мыса Медвежий на юго-западе о. Котельный, где при участии А.Ф. Трёшникова была открыта станция Пролив Санникова. Наряду с другими собранными данными приведенные в книге сведения позволили сделать выбор в пользу этой станции. В начале октября НЭС «Академик Трёшников» подошло к о. Котельный для снабжения одноименной станции. 2 октября вертолетом с борта судна отряд из двух мерзлотоведов с буровой установкой был переброшен на метеостанцию МГ-2 Пролив Санникова. Поверхность здесь покрыта образующимися при вытаивании ледяных жил коническими буграми — байджарахами. Скважина глубиной 25 м, пробуренная в 40 м от метеоплощадки, вскрыла разрез так называемого ледового комплекса — сильнольдистых суглинков и ПЖЛ, подстилаемых с глубины 20,4 м аргиллитами.

20 октября НЭС «Академик Трёшников» подошло к МГ-2 Пролив Санникова для ее снабжения и забрало мерзлотоведов. С приближением полярной ночи дальнейшие буровые работы сезона 2023 года стали невозможны. В этом же рейсе оборудование было заброшено на о. Врангеля для проведения работ в следующем году.

Остров Врангеля. Для выяснения закономерностей формирования мерзлотных условий на высокоширотной трансекте о. Врангеля имеет особое значение как самый восточный пункт, на климате которого сказывается влияние теплых атмосферных и океанических тихоокеанских масс. Полевому этапу предшествовал ряд согласований, так как работать предстояло в охранной зоне заповедника «Остров Врангеля». Работы по обустройству государственного пункта мониторинга на этом острове проведены с 29 апреля по 24 мая 2024 года. Заброска и вывоз отряда из трех человек выполнены вертолетом из г. Певека. На о. Врангеля мощность чехла рыхлых отложений в целом невысока, и при планировании работ было понятно, что скважина глубиной 25 м неминуемо достаточно быстро встретит в своем разрезе скальные грунты. На геологической карте острова в районе метеорологической станции МГ-2 о. Врангеля показаны морские четвертичные осадки, подстилаемые глинистыми сланцами триаса. Из опыта бурения на Шпицбергене и на Новосибирских островах мы знали, что малогабаритная установка с трудом, но справляется с бурением глинистых сланцев. Скважину заложили на морской абразионно-аккумулятивной террасе в 35 м от метеоплощадки. Работы по ее проходке и обустройству термодоской были закончены 13 мая. Верхняя часть вскрытого скважиной разреза была представлена мерзлыми морскими суглинками с включениями гальки, а с глубины 3 м шли трещиноватые глинистые сланцы с прожилками кварца. Как известно, 180-й меридиан рассекает о. Врангеля на две части. Поэтому термометрическая скважина на МГ-2 о. Врангеля стала первой в Западном полушарии Земли

из пробуренных на данный момент в сети ГСМ СММ. Для изучения криогенного строения отложений было выполнено бурение дополнительных скважин на песчано-галечной отмели (рядом с метеоплощадкой старой полярной станции) и на участке выраженного развития ПЖЛ в 6 км западнее поселка Ушаковский. Первой из них был вскрыт криопэг, а второй — сильнольдистые суглинки и ледогрунт. В ходе рекогносцировки в устьевой зоне р. Нашей описаны наледные бугры — блистеры с незамерзающим рассолом, образование которых, по видимому, происходит по сходному механизму с буграми на Северной Земле. Интересно, что аналогичные бугры высотой до 5 м были описаны и сфотографированы С.В. Обручевым в ходе маршрутов по материковой Чукотке в 1930-х годах.

Основные итоги. Идея закрытия «белого пятна» в геофизиологии высокоширотной Арктики и формирования системы мониторинга на трансекте арх. Шпицберген — о. Врангеля была впервые высказана нами на конференции Svalbard Science Conference в г. Осло осенью 2019 года (Permafrost monitoring network as part of Eurasian Arctic high-latitude permafrost monitoring transect, N.E. Demidov, S.R. Verkulich, V.E. Demidov, L. Schirrmeister, S. Wetterich). Благодаря плану работ российских научных баз на Шпицбергене и Северной Земле и поддержке гранта РНФ на первом этапе, а также старту проекта формирования Государственной системы фонового мониторинга состояния многолетней мерзлоты на втором этапе наблюдательная трансекта была сформирована в кратчайшие сроки. Необходимо отметить, что наличие в системе Росгидромета полярных станций предоставило возможность работать с опорой на существующую инфраструктуру без сложных и дорогостоящих операций по развертыванию полевых лагерей. Проживание на станции позволяет минимизировать опасности, связанные с белым медведем. Участники работ с благодарностью вспоминают станционных собак: Хейсу и Диксона на ОГМС им. Э.Т. Кренкеля, Боцмана и Палыча на МГ-2 о. Визе, Панду на МГ-2 о. Врангеля и др., которые с удовольствием несли караул на буровых площадках и участвовали в маршрутах. С научной точки зрения увязка термометрических скважин и площадок мониторинга СТС с метеостанциями также крайне важна, что отражено в РД 52.17.925–2023. По сути, пункт мониторинга представляет собой целый приборный комплекс,

Бурение на метеостанции МГ-2 о. Врангеля



отслеживающий составляющие радиационно-теплового баланса и параметры состояния мерзлоты.

На большей части трансекты бурение термометрических скважин выполнено впервые, и впервые получены данные о температурном режиме грунтов (на геофизиологической карте СССР температурная характеристика мерзлоты арктических архипелагов была дана исходя из теоретических предположений по данным о температурах воздуха с метеостанций). Сравнительный анализ данных по скважинам показывает, что на Шпицбергене велико влияние атлантических океанических и атмосферных масс — температура на подошве слоя годовых теплооборотов составляет все-



Наледь в долине Колесдален на арх. Шпицберген (для масштаба см. снегоходы в нижней части снимка)

го $-3,5... -2,0$ °С. Это единственный из изученных нами архипелагов, на котором деградация мерзлых грунтов прогнозируется уже в ближайшие десятилетия. С учетом наличия на Шпицбергене российских поселков с масштабной инфраструктурой этот вывод требует особого внимания. На Земле Франца-Иосифа влияние Атлантики ослабевает, но еще чувствуется. Несмотря на то, что обустроенная скважина на о. Хейса — самая северная в сети ГСМ СММ (как и самая северная на данный момент термометрическая скважина в Евразии в целом), температура мерзлоты здесь несколько выше (-9 °С), чем в скважинах на более восточных, но менее высокорасположенных в широтном отношении станциях на о. Визе, Северной Земле и Новосибирских островах ($-10... -11$ °С). Таким образом, показано, что в высокоширотной Арктике, как и в континентальной части криолитозоны, наблюдается влияние западного переноса. На о. Врангеля влияние Тихого океана и относительно низкая широта проявляются в повышении температуры мерзлоты на подошве слоя годовых теплооборотов до -7 °С. Единственным из обследованных архипелагов и островов, где существует разгрузка на поверхность межмерзлотных и подмерзлотных вод, является Шпицберген. Это объясняется расположением архипелага в активной тектонической и вулканической зоне с проявлениями гидротерм и наличием теплых ледников, питающих подземные воды. Только на Шпицбергене имеются крупные наледы и гидролакколиты — свидетели разгрузки подземных вод. Небольшие сезонные бугры пучения, как и наледные

бугры-блистеры, встречаются на всех архипелагах. Одним из основных проявлений мерзлоты в рельефе арктических островов и архипелагов можно считать полигональную сеть, формируемую ПЖЛ. Температурные кривые по скважинам имеют тенденцию отклоняться с глубиной в сторону отрицательных температур. Этот эффект говорит о том, что в верхней толще мерзлых пород происходит рост температуры вследствие потепления климата, тогда как ниже располагается толща мерзлоты, которая еще не затронута этим процессом. После накопления данных измерений температур в скважинах в годовом цикле можно будет впервые в деталях проанализировать специфику формирования температурного режима пород в высокоширотной Арктике, которая обеспечивается явно выраженным наличием полярного дня и полярной ночи, коротким бесснежным периодом, крайне низкими среднегодовыми температурами пород (за исключением Шпицбергена температуры в высокоширотной Арктике оказались ниже, чем в скважине ГСМ СММ в Оймяконе) и другими факторами. С практических позиций сформированная сеть уже сейчас дает информацию, на которую можно опереться при проектировании инфраструктуры в акватории Северного морского пути.

*Н.Э. Демидов, Ю.В. Угрюмов (ААНИИ).
Фото Н.Э. Демидова и А.В. Гузевой*

Самый высокий гидролакколит на Шпицбергене (для масштаба см. фигуру человека на вершине), долина Рейндален

