

ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ МЕРЗЛОТНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ НА КРИОСФЕРНОМ ПОЛИГОНЕ РОССИЙСКОГО НАУЧНОГО ЦЕНТРА НА АРХИПЕЛАГЕ ШПИЦБЕРГЕН (РНЦШ)

канд. геол.-минерал. наук Н.Э. ДЕМИДОВ^{1,2}, млад. науч. сотр. Е.С. КАРАЕВСКАЯ³,
д-р геогр. наук С.Р. ВЕРКУЛИЧ², канд. геогр. наук А.Л. НИКУЛИНА³,
д-р геогр. наук Л.М. САВАТЮГИН².

¹ — ФАНО ФГБУН Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва, e-mail: nikedemidov@mail.ru

² — ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, e-mail: verkulich@aari.ru

³ — ФАНО ФГБУН Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Пуццино

В 2016 г. на криосферном полигоне РНЦШ (о. Западный Шпицберген) впервые начаты долговременные наблюдения за состоянием мерзлых пород. Полигон расположен в окрестностях пос. Баренцбург на типичной для побережья Шпицбергена лестнице голоценовых морских террас. Согласно результатам проведенного колонкового бурения мощность гравелистых песков и суглинков с массивной и шлировой криотекстурой, слагающих аккумулятивные террасы, варьирует от 2 до 7 м; ниже залегают меловые и неогеновые трещиноватые песчаники и сланцы. Две скважины оборудованы автоматическими термометрическими косами для мониторинга температуры на глубине нулевых амплитуд и сезонного проникновения в грунт нулевой изотермы. Температура на глубине 15 м составила $-2,37$ °С. Измерения мощности сезонно-талого слоя, проведенные в сентябре по регулярной сетке с шагом в 10 м на площадке размером 100×100 м, показали значения от 1,15 до 2,60 м при среднем значении 1,56 м. Выявленный по результатам анализа водной вытяжки геохимический барьер, находящийся на 0,8–1,6 м ниже верхней границы мерзлоты в момент максимального оттаивания, вероятно, маркирует глубину оттаивания во время голоценового оптимума. Сделаны предложения по продолжению и расширению начатых на криосферном полигоне долговременных наблюдений за динамикой мерзлоты Шпицбергена.

Ключевые слова: Шпицберген, вечная мерзлота, сезонно-талый слой.

ВВЕДЕНИЕ

Вечная мерзлота — наиболее инерционная составляющая в климатической системе атмосфера – океан – земная поверхность. В то же время проводимые в последние десятилетия наблюдения за реакцией мерзлоты Северного полушария на потепление климата достаточно однозначно указывают на возрастание среднегодовых температур грунта, интенсификацию термокараста и термоабразии морских берегов, увеличение мощности сезонно-талого слоя (СТС). Так, по данным международной программы циркумполярного мониторинга деятельного слоя CALM (*circumpolar active-layer monitoring*), более чем десятилетние ряды наблюдений показывают ско-

рость увеличения мощности СТС от 2 до 6 см/год на севере европейской части России, 0–2 см/год на севере Западной Сибири, ~1,5 см/год на севере Восточной Сибири и ~1 см/год — на Чукотке (Анисимов и др., 2012). За последние 20–30 лет температура мерзлоты на глубине нулевых годовых амплитуд в среднем повысилась на 0,5–2 °С.

Острова в Российском секторе Арктики представляют собой «белое пятно» в созданной за последние десятилетия обширной сети наблюдательных мерзлотных станций, отдельных площадок, профилей и скважин. Знание современной мерзлотной обстановки и прогноза ее изменения важно не только с научных, но и с практических позиций, так как на архипелагах Российской Арктики возобновляется строительство различных сооружений. В этом отношении особый интерес представляет Шпицберген, расположенный у западной границы Российской Арктики в северо-атлантической зоне, первый из арктических архипелагов, стоящий на пути западного атмосферного переноса и тепляющего влияния Гольфстрима, что делает мерзлоту архипелага наиболее чувствительной к изменениям в атмосфере и океане, а темпы изменения геокриологических условий одними из самых высоких среди арктических островов. Метеорологическими наблюдениями в прошлом веке на Шпицбергене зафиксировано значительное возрастание среднегодовых температур воздуха. Так, на метеостанции в Лонгйире (о. Западный Шпицберген) среднегодовая температура воздуха на уровне моря с 1920 г. за 5 лет повысилась с –9 до –5 °С, после чего она с некоторыми колебаниями продолжила слабый рост и достигла –4 °С (Humlum et al., 2003). В то же время прямой зависимости между тенденцией изменения температуры воздуха и температурным состоянием мерзлых пород не существует, так как климатические изменения могут приводить к трансформации растительного и снежного покровов, оказывающих существенное влияние на мерзлоту. Поэтому для получения наиболее достоверной информации об изменении мерзлотной обстановки требуется постановка специализированных долговременных наблюдений. В данной статье рассказывается о создании криосферного полигона в системе РНЦШ и первых наблюдениях на нем. Полевые работы проводились в августе–сентябре 2016 г. в рамках экспедиции «Баренцбург-2016» и включили в себя следующие исследования: выбор места для криосферного полигона, бурение скважин с целью выявления криолитоологического строения полигона, обустройство термометрических скважин, измерения мощности сезонно-талого слоя. Район расположения криосферного полигона был выбран исходя из следующих критериев: доступность для посещения, расположение в ближайших окрестностях от метеостанции, а также наличие в верхней части разреза льдистых дисперсных мерзлых пород. Удовлетворяющая этим требованиям площадка была найдена в 2 км к северу от Баренцбурга на южном берегу залива Исфьорд.

ИСТОРИЯ МЕРЗЛОТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА ШПИЦБЕРГЕНЕ

Начало мерзлотных изысканий на советских рудниках Шпицбергена явилось требованием практики, когда с вечной мерзлотой столкнулись при проходке угольных шахт, проектировании фундаментов и изыскании источников водоснабжения. В 1935 г., т.е. всего 3 года спустя после приобретения у голландцев угольных участков, Шпицбергенская геологоразведочная экспедиция треста «Арктикуголь» начала проведение гидрогеологических исследований, в которых рассматривался широкий круг вопросов, связанных с вечной мерзлотой (Зенков, 1935). На Баренцбургском месторождении было проведено колонковое бурение порядка 350 поисковых скважин на уголь глубиной до 700 м (План горных выработок по пласту верхнему, 2016). В ряде

скважин проводились измерения глубины нулевой изотермы (Зенков, 1935; Албул, 1947; Обидин, 1953; Обидин, 1958). Также производились измерения температуры по стволам шахт и в шурфах. Сеть скважин позволила выявить закономерности положения нижней границы вечной мерзлоты в зависимости от рельефа местности и удаления от моря, получить температурные кривые, определить характерную глубину нулевых амплитуд и геотермический градиент.

Проведение специализированных инженерно-геологических изысканий на руднике Пирамида было связано с тем, что поселок располагается на мерзлых четвертичных отложениях мощностью в первые десятки метров. В связи с этим большая часть зданий, в том числе и 125-квартирный 4-этажный жилой дом, построенный на свайном фундаменте с вентилируемым подпольем, имели деформации, связанные с неравномерной осадкой (Шеко и др., 1980). Для наблюдения за деформациями здания оснащались специальными реперами. Изучение температурного состояния мерзлоты проводилось также для проектирования термостабилизаторов на основе керосина, которыми оснащен ряд зданий в поселке.

Криогенное строение мерзлых четвертичных пород и подземные льды изучались Б.И. Втюриным в ходе экспедиций ИГ АН СССР 1987–1988 гг. Был сделан вывод, «что на Шпицбергене встречаются все типы, подтипы и виды криогенного строения, хотя масштабы их проявления существенно отличаются от других районов Арктики и Субарктики, особенно континентальных североазиатских» (Втюрин, 1990. С. 49). При этом, исходя из грубозернистого характера отложений, наиболее благоприятные условия на Шпицбергене существуют для цементного типа льдообразования и менее благоприятные — для сегрегационного и залежеобразного.

Следует отметить, что работы Б.И. Втюрина — это одни из немногих опубликованных отечественных работ академического характера по изучению вечной мерзлоты Шпицбергена. Основополагающей работой можно считать также статью сотрудника НИИГА Н.И. Обидина о подземных водах и вечной мерзлоте советских рудников о. Западный Шпицберген по исследованиям 1952–1954 гг. (Обидин, 1958). Другие вышеупомянутые работы представляют собой в основном производственные отчеты, хранящиеся в архивах ПМГРЭ и треста «Арктикуголь».

История норвежских мерзлотных исследований на Шпицбергене подробно рассмотрена в работе (Humlum et al., 2003). До 1970-х гг. исследователи изучали в основном отдельные явления, так или иначе связанные с мерзлотой: грунтовые льды, солифлюкцию, морозобойное растрескивание, сели, родники, ложе ледников и т. п. В 1976 г. была опубликована знаковая статья О. Лейстола (Leistol, 1976), в которой систематизировались данные о мощности и термическом состоянии мерзлоты Шпицбергена. Основываясь на температурных замерах в шахтах, Лейстол оценил величину геотермического градиента для центральной части о. Западный Шпицберген в 2–2,5 °C/100 м. Вопросы существования субмаринной мерзлоты рассматриваются в работах (Gregersen, Eidsmoen, 1988; Landvik et al., 1988). Подземные воды и их взаимосвязь с мерзлотой, в том числе в аспекте их практического использования, освещены в работах (Haldorsen et al., 1996; Haldorsen, Heim, 1999).

В 1978 г. Норвежский комитет по мерзлоте (Norwegian committee on permafrost) начинает стационарные наблюдения за температурным режимом мерзлых пород в скважинах глубиной 2 и 8 м в районе пос. Свеагрува (Bakkehoi, Bandis, 1988). По проекту Permafrost and climate in Europe (PАСЕ) в Центральном Шпицбергене в 1998 г.

были произведены замеры температуры в скважине на глубине 100 м с целью палеотемпературных реконструкций (Isaksen et al., 2000). В 2007 г. были опубликованы результаты мониторинга в данной скважине, показавшие тренд на увеличение температуры (Isaksen et al., 2007). С 1972 г. в районах Кап Лине и Калипсостранд проводятся регулярные замеры мощности сезонно-талого слоя (Christiansen et al., 2003).

Значительным импульсом для изучения вечной мерзлоты на Шпицбергене стал Международный полярный год 2007 г., в рамках которого был реализован проект TSP-Norway по бурению и обустройству под долговременный температурный мониторинг еще четырех скважин глубиной от 5 до 40 м. Все скважины расположены в центральной и западной области о. Западный Шпицберген на удалении не более 60 км от Лонгйира (Christiansen et al., 2010). В настоящее время в норвежском университете UNIS работает группа, занимающаяся обработкой данных температурного мониторинга мерзлоты и заложением новых скважин. Специально под эту задачу в Германии была разработана буровая установка UNIS Permafrost Drill Rig. Максимальная глубина бурения установкой UNIS составила 23 м с отбором кернов и 50 м без отбора (Gilbert et al., 2015).

МЕТОДЫ

Бурение осуществлялось установкой УКБ-12/25 «всухую», без промывки и продувки, для обеспечения сохранения мерзлого состояния кернов для их корректного криолитологического описания и предотвращения их химической и биологической контаминации. При бурении использовались специальные колонковые трубы с твердосплавными коронками внешним диаметром от 112 до 76 мм. Незначительный вес и габариты используемого бурового оборудования позволили выполнить работы без ущерба природной среде и нарушения почвенно-растительного слоя, которое могло бы привести к изменению температурного режима мерзлоты.

Для долговременного мониторинга скважины оборудовались термокосами фирмы Gloria (Германия). Регистрация температур проводится в автоматическом режиме четыре раза в сутки. Длина термокос 10 и 15 м с шагом между датчиками 0,5 и 0,75 м соответственно. Первые замеры проводились в затампонированных скважинах более чем через неделю после завершения бурения.

Для мониторинга мощности СТС в пределах криосферного полигона была заложена площадка по методике CALM. CALM — Международная программа циркумполярного мониторинга деятельного слоя, созданная в 1990 г. и являющаяся составляющей систем GTOS (Global Terrestrial Observing System) и GCOS (Global Climate Observing System), работающих под эгидой Всемирной метеорологической организации (ВМО). Площадка CALM на полигоне квадратная, площадью 1 га, ее углы размечены кольями, координаты которых отсняты с помощью GPS. Измерения СТС проводились в начале сентября с выпадением первого снега с шагом в 10 м в 121 точке. Несмотря на значительную мощность СТС и наличие гравия и гальки в его разрезе, глубина залегания мерзлоты достаточно хорошо фиксировалась при вбивании шупа кувалдой благодаря различию в механических свойствах талого и мерзлого грунта.

В образцах мерзлых пород, полученных при бурении, измерялись весовая влажность и химический состав водной вытяжки. Процентное содержание воды определялось весовым способом. Для приготовления водной вытяжки из предварительно просушенного и просеянного через сито диаметром 1 мм мерзлого грунта была взята навеска 20 г и залита 100 мл деионизованной воды. Полученная суспензия фильтровалась через нейлоновые

фильтры с диаметром пор 0,45 мкм после перемешивания в течение трех минут. Водородный показатель водной вытяжки был измерен на рН-метре Mettler Toledo Seven Compact S 220; перед каждой серией образцов проводился контроль градуировочной характеристики по стандартному образцу с рН 7,01. Общая минерализация рассчитывалась из удельной электропроводности водной вытяжки, полученной с помощью кондуктометра Mettler Toledo Seven Compact S 230; перед каждой серией измерений проводился контроль градуировочной характеристики по стандартному образцу электропроводности 1413 мкСм/см. Основные анионы и катионы в водной вытяжке определялись методом ионной хроматографии на жидкостном хроматографе Shimadzu LC-20 Prominence с кондуктометрическим детектором Shimadzu CDD-10AVp и ионообменными колонками Phenomenex Star-ion A300 и Shodex ICYS-50 на двух уровнях чувствительности. Стабильность градуировок проверялась перед каждой серией образцов и удовлетворяла условиям измерений. Для контроля точности делались выборочные измерения параллельных проб в каждой серии, отклонения от среднего значения удовлетворяли условиям методики по каждому иону.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Геоморфологическая привязка и криолитологическое строение

В геоморфологическом отношении полигон представляет собой типичную для побережья Западного Шпицбергена лестницу морских абразионно-аккумулятивных террас, поэтому наблюдения на криосферном полигоне можно будет с определенной степенью достоверности экстраполировать и на другие районы побережья Шпицбергена. Террасы спускаются к заливу Ис-фьорд с высоты около 100 м и, вероятно, имеют голоценовый возраст, они перекрывают коренные породы, представленные меловыми и неогеновыми песчаниками и сланцами. Террасы соответствуют различным уровням стояния моря в голоцене, когда на фоне поднятия Шпицбергена происходили задержки и уровень моря относительно долго оставался неизменным.

В пределах криосферного полигона фиксируются следующие мерзлотные процессы и явления: солифлюкция, пятна-медальоны, локально-морозобойные трещины. Термоабразия развита слабо, так как береговой уступ первой террасы слагается, за исключением верхних двух метров, скальными породами. На полигоне отмечаются

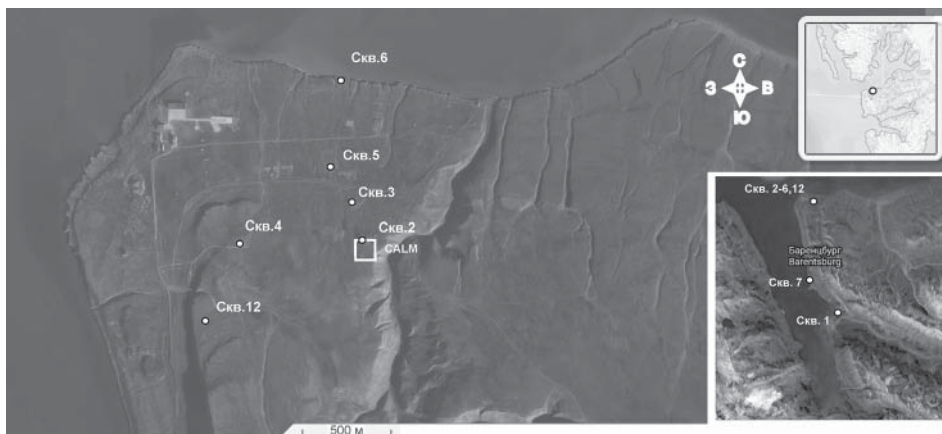


Рис. 1. Спутниковое изображение криосферного полигона в Баренцбурге с указанием мест расположения скважин и площадки наблюдений за мощностью сезонно-талого слоя по программе CALM.

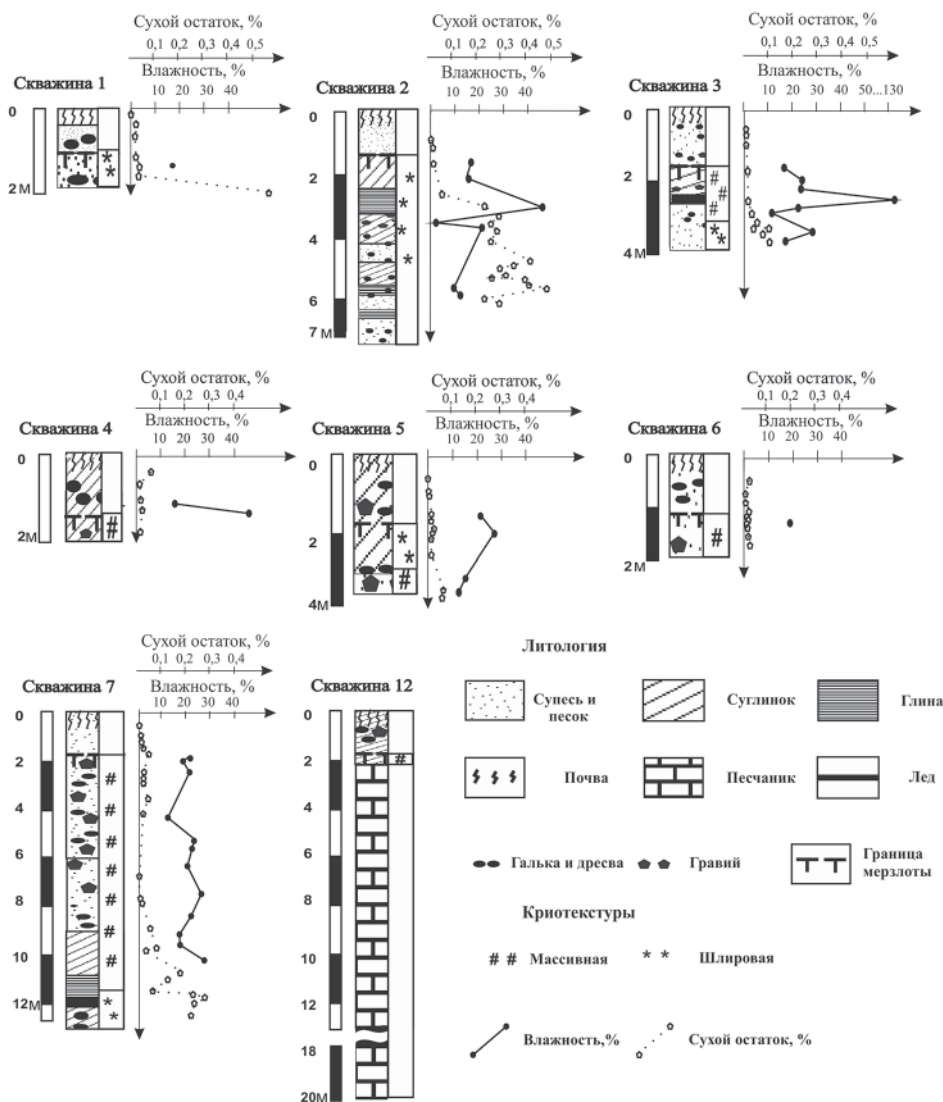


Рис. 2. Криолитологические колонки скважин.

проявления термокарста и термоэрозии в местах, где во время геологоразведочных работ 1930–1950-х гг. устанавливались балки буровых установок. В соседней долине Грёндален в зимнее время формируются наледи и имеются бугры пучения — булгуны.

По геоморфологическому профилю вкrest лестницы морских террас были пробурены скважины для термометрических измерений, выяснения криолитологического строения и отбора кернов для палеогеографических реконструкций (рис. 1). Мощность аккумулятивных отложений, образующих террасы, по результатам бурения варьирует от 2 до 7 м (рис. 2). Террасы характеризуются однотипным криолитологическим строением, отражающим смену фациальной обстановки в процессе накопления отложений. Сверху залегают суглинки и пески мощностью около 1,5 м,

далее идет гравийно-галечниковый грунт с темным песчано-илистым заполнителем и массивной (редко атакситовой) криотекстурой, далее мерзлые глины с сетчатой и слоистой криотекстурой, включающие прослой ледогрунта и льда мощностью до 20 см, далее пески с массивной криотекстурой и значительным содержанием гравия и гальки, подстилаемые скальным основанием.

Температурные кривые

В пределах криосферного полигона была оборудована геотермическая скважина № 12 глубиной 20 м для наблюдений за изменением температуры на глубине нулевых годовых амплитуд. В настоящее время в скважину установлена коса с температурными датчиками с шагом 0,75 м до глубины в 15 м. Так как в районе полигона в 1940–1961 гг. происходила подземная разработка месторождения угля, место для термометрической скважины было специально выбрано так, чтобы в окрестностях скважины не было подземных выработок, которые могли бы повлиять на распределение теплового потока. Разрез скважины № 12 до глубины в 2 м представлен гравелистым суглинком с включениями гальки, далее — трещиноватым песчаником. Температурная кривая за 5.09.2016 г. представлена на рис. 3. Температура на глубине в 15 м составила $-2,37^{\circ}\text{C}$. Вторая термометрическая скважина (скв. 2) пройдена в пределах полигона мониторинга мощности СТС. Глубина скважины 7,5 м, основная цель температурного мониторинга в данной скважине — наблюдение за проникновением в грунт изотермы

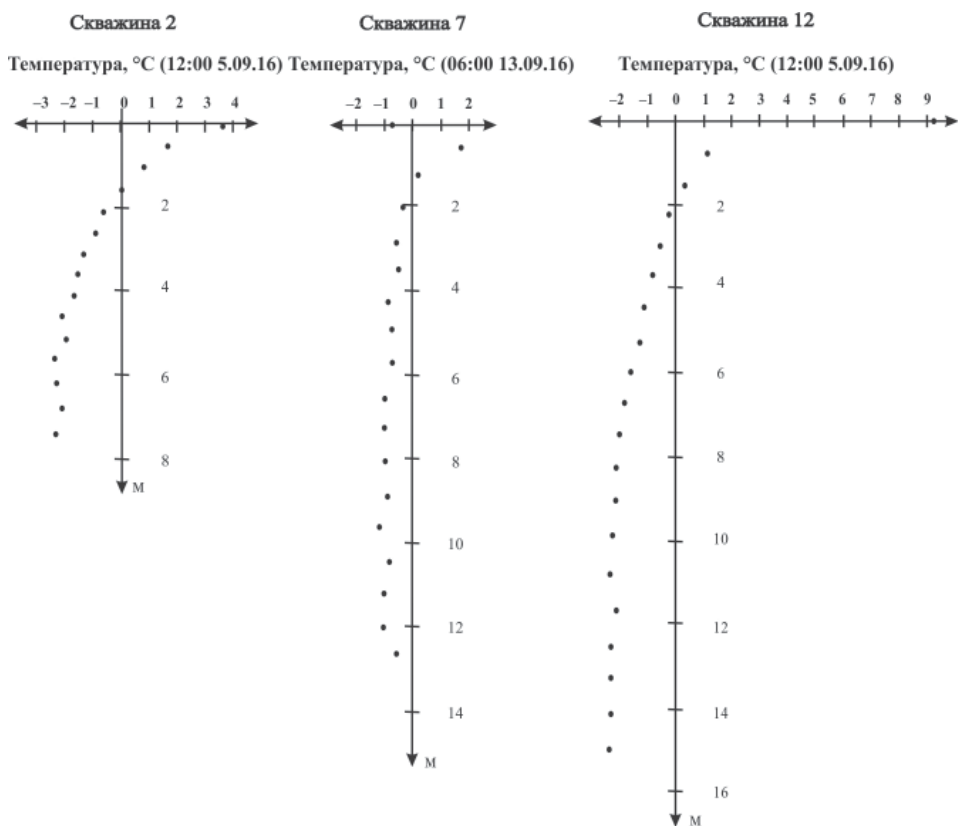


Рис. 3. Температурные кривые по скважинам 2, 7 и 12.

0 °С. До глубины в 7,0 м скважиной вскрыт разрез морской террасы, нижние 0,5 м пробурены по коренным породам. Температурная кривая по скважине 2 за 5.09.2016 г. показана на рис. 3. Нулевая изотерма на момент проведения измерений находилась на глубине 1,5 м; на глубине 7,5 м температура составила –2,18 °С.

Разовый термометрический замер был также сделан в скважине 7, которая расположена в 5 м от бровки морской террасы и в 20 м от моря. Температурная кривая по скважине 7 за 12.09.16 г. (рис. 3) наглядно демонстрирует отепляющий эффект от моря. Температура на глубине 12,5 м составила –0,87 °С.

Мощность сезонно-талого слоя

Мощность СТС на мониторинговой площадке варьировала от 1,15 м до 2,60 м при среднем значении в 1,56 м (рис. 4). Определенная шупом мощность СТС в ближайшем пикете к скважине 2 совпадает с таковой, определенной по глубине залегания нулевой изотермы в этой скважине. Мощность СТС в пределах площадки увеличивается в южном направлении, несмотря на то, что южная часть площадки имеет уклон северной экспозиции. По-видимому, это связано с отсутствием здесь выраженного мохового покрова или с особенностями снегонакопления. Вторая особенность площадки — увеличение мощности деятельного слоя на западной границе. Здесь проходят сухие русла весенних водотоков, по которым идет отепляющее воздействие от поверхностного стока и надмерзлотных вод.

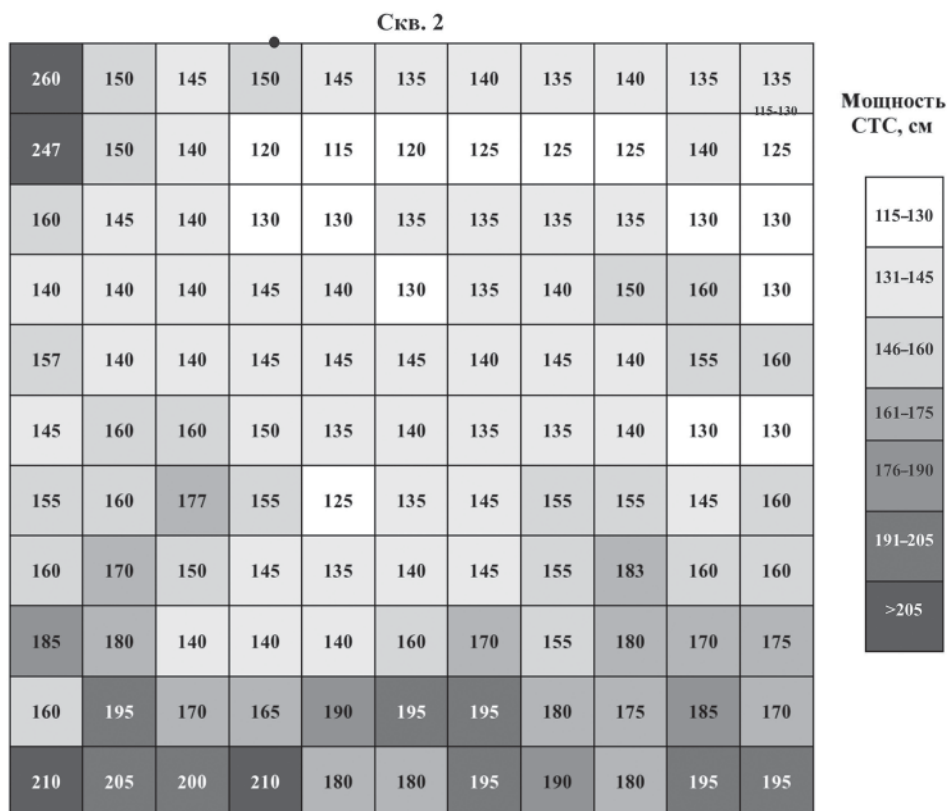


Рис. 4. Схема вариации мощности СТС на мониторинговой площадке (север вверху).

Химический анализ водной вытяжки

Результаты химического анализа водной вытяжки представлены в таблице. Обращает на себя внимание факт, что с некоторой глубины происходит резкое увеличение значений общей минерализации от характерных значений 0,001–0,05 до 0,1–0,6 %. При этом в нижних пачках преобладает в основном хлоридно-сульфатно-натриевый тип засоления. рН водной вытяжки также различен в верхних и нижних пачках. В верхних пачках значения рН значительно меньше и могут опускаться ниже 7, тогда как в нижних пачках рН может превышать 8.

Таблица

Результаты химического анализа водной вытяжки

Номер пробы	рН (H ₂ O)	ОМ*, %	Содержание основных ионов в водной вытяжке, мг/дм ³							
			F ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
Скв. 1 / 0,05 м	7,30	0,009	0,25	10,27	2,99	9,05	2,92	11,5	1,47	0,55
Скв. 1 / 0,45 м	6,90	0,024	0,094	4,93	12,9	16,6	6,31	5,93	3,59	1,33
Скв. 1 / 1,7 м	7,62	0,036	0,13	12,7	20,8	7,47	18,3	4,6	3,28	1,59
Скв. 1 / 2,0 м	8,40	0,566	0,47	427,1	44,9	95,7	368,7	37,4	10,2	9,36
Скв. 2 / 0,9–1,0 м	6,82	0,006	0,17	6,29	1,25	4,92	2,88	7,24	0,58	0,18
Скв. 2 / 1,7 м	6,69	0,007	0,077	14,67	3,16	4,06	3,77	16,2	0,80	0,34
Скв. 2 / 2,3–4,5 м	6,97	0,063	0,28	38,88	18,4	7,00	40,6	2,74	0,98	0,65
Скв. 2 / 2,8 м	7,19	0,222	0,55	115,8	130,5	16,3	162,7	16,3	9,20	3,93
Скв. 2 / 3,2 м	7,69	0,294	1,65	193,8	155,2	–	229,2	64,4	4,30	1,89
Скв. 2 / 4,5 м	8,19	0,401	1,27	152,6	225,8	73,4	273,7	27,9	4,97	4,72
Скв. 2 / 4,7 м	8,29	0,361	1,27	157,7	229,1	56,2	251,8	48,9	2,64	3,03
Скв. 2 / 4,9–5,0 м	7,32	0,328	0,27	74,5	305,5	7,79	217,6	17,9	15,3	6,14
Скв. 2 / 5,25 м	7,18	0,408	0,50	110,7	316,2	20,0	219,2	44,4	16,4	9,29
Скв. 2 / 5,3 м	7,6	0,425	0,56	132,6	368,0	26,0	252,7	47,3	23,0	12,8
Скв. 2 / 7,0 м	7,11	0,397	0,52	95,2	365,3	14,32	214,0	51,4	27,2	9,30
Скв. 3 / 0,75 м	6,16	0,007	0,064	15,7	3,57	4,49	2,67	18,6	0,59	0,33
Скв. 3 / 2,0 м	6,72	0,014	0,052	12,9	8,18	4,87	5,06	17,2	1,06	0,50
Скв. 3 / 2,7 м	6,99	0,014	0,40	6,52	6,03	6,16	6,35	8,33	0,95	0,46
Скв. 3 / 3,0 м	7,64	0,035	0,34	6,62	25,1	11,5	10,1	6,75	4,44	1,45
Скв. 3 / 3,3 м	7,36	0,056	0,46	10,1	50,7	16,2	14,6	14,1	9,74	3,05
Скв. 3 / 3,4 м	7,59	0,114	0,33	27,2	77,4	22,4	32,2	31,9	17,5	4,94

Номер пробы	рН (H ₂ O)	ОМ*, %	Содержание основных ионов в водной вытяжке, мг/дм ³							
			F ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Na ²⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
Скв. 3 / 3,75 м	7,42	0,118	0,32	6,80	126,3	17,4	34,8	16,2	21,6	6,07
Скв. 4 / 0,5 м	6,71	0,058	0,20	13,1	63,7	16,4	10,5	17,6	12,1	5,99
Скв. 4 / 0,75 м	7,18	0,013	0,35	25,9	5,75	12,4	2,63	35,6	1,70	0,91
Скв. 4 / 1,0 м	6,69	0,018	0,51	20,2	5,42	18,5	4,32	25,4	2,14	1,15
Скв. 4 / 1,8 м	6,94	0,017	0,20	18,4	2,69	—	11,0	13,9	1,39	0,67
Скв. 5 / 0,5 м	7,30	0,006	0,067	5,15	2,54	3,68	2,71	5,38	0,79	0,26
Скв. 5 / 0,75 м	7,03	0,006	0,026	3,72	1,85	7,26	2,08	3,37	0,69	0,20
Скв. 5 / 1,0 м	7,06	0,009	0,025	1,33	1,71	5,68	2,08	1,22	0,34	0,12
Скв. 5 / 1,25 м	6,86	0,021	0,078	8,53	9,17	8,05	30,3	15,8	3,09	1,06
Скв. 5 / 1,5 м	7,01	0,010	0,12	2,86	4,37	5,47	3,17	2,56	1,11	0,36
Скв. 5 / 2,5 м	7,14	0,013	0,10	8,50	6,41	8,74	4,35	8,08	1,50	0,56
Скв. 5 / 3,35 м	8,39	0,095	0,93	10,4	32,7	97,3	56,9	25,9	3,06	1,13
Скв. 5 / 3,4 м	8,27	0,084	0,88	16,0	41,5	60,5	54,9	17,9	1,12	0,55
Скв. 6 / 0,5 м	6,39	0,024	<0,01	17,0	1,03	2,09	2,53	18,8	0,48	0,23
Скв. 6 / 1,0 м	6,89	0,006	0,079	30,3	2,04	4,27	2,53	38,6	0,62	0,23
Скв. 6 / 1,3 м	6,70	0,012	0,11	6,23	2,04	4,19	2,76	6,7	0,73	0,27
Скв. 6 / 1,5 м	7,04	0,011	0,11	3,40	4,87	4,46	3,80	3,18	1,44	0,48
Скв. 6 / 2,0–2,1 м	6,94	0,022	0,049	6,08	17,1	3,50	7,54	7,61	2,26	0,69
Скв. 7 / 0,5 м	7,00	0,005	0,069	3,01	2,46	3,75	3,18	3,21	0,48	0,14
Скв. 7 / 2,5 м	7,55	0,013	0,091	2,17	3,35	9,21	5,29	5,16	1,64	0,51
Скв. 7 / 4,1–4,2 м	7,81	0,016	0,97	3,81	5,04	15,0	7,03	4,39	1,89	0,62
Скв. 7 / 7,8–7,9 м	7,39	0,009	0,056	9,21	4,30	4,47	3,10	11,8	1,00	0,20
Скв. 7 / 8,9 м	7,09	0,048	0,055	11,2	25,1	6,74	7,28	15,5	10,3	2,83
Скв. 7 / 9,7 м	6,83	0,091	0,086	13,9	80,2	10,1	19,6	17,0	23,2	5,34
Скв. 7 / 10,8 м	6,74	0,179	1,01	84,8	86,9	163,3	187,2	84,5	3,60	2,90
Скв. 7 / 11,6 м	8,61	0,269	1,17	37,1	45,1	—	117,1	23,0	8,07	6,03
Скв. 7 / 12,4 м	8,38	0,201	0,53	33,9	101,6	113,3	128,6	45,3	10,3	4,55

Примечание. * — Общая минерализация, % сух. веса

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе экспедиционных работ проведены рекогносцировка геокриологических условий в районе Баренцбурга и выбор района расположения криосферного полигона, охарактеризовано его строение и сделаны первые наблюдения за основными параметрами мониторинга криолитозоны — температурой на глубине нулевых годовых амплитуд и мощностью СТС. Первые статистически обоснованные данные о динамике данных параметров могут быть получены спустя как минимум 5–10 лет непрерывных наблюдений, для чего необходимо ежегодное посещение полигона в осеннее время. Мониторинг поставлен по методике близкой к таковой, используемой в программах CALM и TSP – Norway, что позволяет интегрировать получаемые данные в международные программы.

После получения годовой картины изменения температуры в скважине 2 представляется важным выявить время максимального проникновения в грунт нулевой изотермы для того, чтобы дальнейший мониторинг мощности СТС с помощью металлического шупа проводить в момент максимального оттаивания. Выявленное по результатам анализа водной вытяжки резкое увеличение общей минерализации на глубине 0,8–1,6 м от верхней границы мерзлоты (в момент максимального развития СТС), вероятно, связано с оттаиванием на эту глубину в голоцене и выносом солей из породы надмерзлотными водами. Этот геохимический барьер может являться маркером глубины протаивания во время голоценового оптимума. Соответственно, отложения, находящиеся выше геохимической границы, следует рассматривать как эпигенетически промерзшие, тогда как нижележащие могут являться как эпигенетическими, так и сингенетическими. Путем решения обратной задачи — определения температурных условий на поверхности, необходимых для того, чтобы СТС достиг глубины геохимического барьера, можно восстановить климатические условия в данном районе Шпицбергена в эпоху голоценового оптимума.

Так как обусловленное потеплением климата изменение характеристик снежного и растительного покровов может смягчить, а в некоторых случаях даже изменить вектор изменения температурного состояния мерзлых пород, на криосферном полигоне РНЦШ необходимо периодически проводить геоботанические наблюдения и снегомерную съемку. Известно, что в случае если увеличивающийся СТС затрагивает переходный слой мерзлых пород с повышенной льдистостью, происходит осадка поверхности, заболачивание и развитие термокарста. Поэтому еще одним направлением в расширении спектра наблюдений на полигоне может стать повторное лазерное нивелирование или высокоточное спутниковое нивелирование площадки CALM. Для определения величины теплового потока из недр представляется необходимым одну из скважин на полигоне оборудовать тепломером. Чрезвычайный интерес представляет также проведение повторных измерений в глубоких скважинах треста «Арктикуголь», по которым имеются результаты разовых термометрических измерений, сделанных в период геологоразведочных работ 1930–1980 гг. По этим скважинам могут быть получены максимально длительные тренды изменения температурного состояния мерзлоты на Шпицбергене.

Полевые работы выполнены в рамках экспедиции «Баренцбург-2016» Российской арктической экспедиции на архипелаге Шпицберген (РАЭ-Ш, ААНИИ). Химические исследования проводились в аналитической лаборатории Российского научного центра в пос. Баренцбург, сотрудников которой благодарим за помощь с пробоподготовкой и анализами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Албул С.П. Предварительный отчет о гидрогеологических работах на месторождении «Баренцбург» // Производственный отчет «Гипрошахт», 1947–1948. Инв. № 96. 26 с.
- Анисимов О.А., Анохин Ю.А., Лавров С.А., Малкова Г.В., Мяс Л.Т., Павлов А.В., Романовский В.А., Стрелецкий Д.А., Холодов А.Л., Шикломанов Н.И. Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем. Глава 8. Континентальная многолетняя мерзлота. М.: Росгидромет, 2012. С. 301–359.
- Втюрин Б.И. Криогенное строение рыхлых отложений Шпицбергена // Материалы гляциологических исследований. 1990. № 70. С. 43–49.
- Втюрин Б.И. Подземные льды Шпицбергена // Материалы гляциологических исследований. 1989. № 65. С. 69–75.
- Евдокимов А.Н. Вулканы Шпицбергена. СПб.: ВНИИОкеангеология, 2000. 123 с.
- Зенков К.А. Отчет о геологоразведочных работах на советских участках острова Западный Шпицберген, проведенных в 1935–1936 гг. // Производственный отчет «Арктикуголь», 1935. Инв. № 150. 70 с.
- Карпов А.Ф. Состояние изученности и степень разведанности месторождений углей на о. Шпицберген // Производственный отчет «Главуглеразведка» трест «Ленуглеразведка» Л., 1946. 85 с.
- Обидин Н.И. Мерзлота и подземные воды Баренцбурга, Груманта и Пирамиды острова Шпицберген (Предварительные отчет по исследованиям 1952 г.) // Производственный отчет Научно-исследовательского института геологии Арктики. 1953. 37 с.
- Обидин Н.И. Новые данные о подземных водах и вечной мерзлоте советских рудников острова Шпицберген по исследованиям 1952–1954 гг. // Тр. НИИГА. 1958. Т. 85. Вып. 9. С. 129–140.
- План горных выработок по пласту Верхнему. М 1: 5000 // Архив ГТ «Арктикуголь», 2016. 1 л.
- Шеко А.И., Гречищев С.Е., Постоев Г.П. Разработка рекомендаций по проведению инженерно-геологических исследований на объектах рудников Баренцбург и Пирамида на Шпицбергене // Производственный отчет Всесоюзного научно-исследовательского института гидрогеологии и инженерной геологии ВСЕГИНГЕО. Производственный отчет по теме УШ ЗГЦ4(3) 70-3/99-ВОД. Пос. Зеленый, 1980. 98 с.
- Bakkehoi S., Bandis C. Meteorological conditions influence on the permafrost ground in Sveagruva, Spitsbergen // Oslo: Norw. Geotech. Inst. 1988. Publ. 176. P. 39–43.
- Christiansen H.H., Akerman J.H., Repelewska-Pekalowa Y. Active layer dynamics in Greenland, Svalbard and Sweden // Extended abstract for the 8th International Permafrost Conference, Zurich, July, 2003. P. 19–20.
- Christiansen H. H., Etzelmüller B., Isaksen K., Juliussen H., Farbroth H., Humlum O., Johansson M., Ingeman-Nielsen T., Kristensen L., Hjort J., Holmlund P., Sanne A.B.K., Sigsgaard C., Akerman H.J., Foged N., Blikra L.H., Pernosky M.A., Odegard R.S. The Thermal State of Permafrost in the Nordic Area during the International Polar Year 2007–2009 // Permafrost Periglac. 2010. Vol. 21. P. 156–181. doi:10.1002/pp.687.
- Etzelmüller B., Schuler T.V., Isaksen K., Christiansen H.H., Farbroth H., Benestad R. Modelling past and future permafrost conditions in Svalbard // The Cryosphere Discuss. 2010. Vol. 4. P. 1877–1908.
- Gilbert G.L., Christiansen H.H., Neumann U. Coring of unconsolidated permafrost deposits: methodological successes and challenges // Proceedings of GeoQuebec 2015 Challenges from North to South, Quebec City. 2015. P. 236.
- Gregersen O., Eidsmoen T. Permafrost conditions in the shore area at Svalbard // 5th International Conference on permafrost. Norway. August 2–5. 1988. Nor. Geotech. Inst. Publ. Vol. 177.
- Humlum O., Instanes A., Sollid J.L. Permafrost in Svalbard: a review of research history, climatic background and engineering challenges // Polar Res. 2003. Vol. 22. P. 191–215.

Haldorsen S., Heim H., Lauritzen S.E. Subpermafrost groundwater of western Svalbard // Nord. Hydrol. 1996. Vol. 27. P. 57–68.

Haldorsen S., Heim M. An Arctic groundwater system and its dependence upon climate change: an example from Svalbard // Permafrost and Pereglaial Process. 1999. Vol. 10. P. 137–149.

Isaksen K., Vonder Mühl D., Gubler H., Kohl T., Sollid J.L. Ground surface temperature reconstruction based on data from a deep borehole in permafrost at Janssonhaugen, 25 Svalbard // Ann. Glaciol. 2000. Vol. 31. P. 287–294.

Isaksen K., Sollid J.L., Holmlund P., Harris C. Recent warming of mountain permafrost in Svalbard and Scandinavia // J. Geophys. Res. 2007. Vol. 112. F02S04, doi:10.1029/2006JF000522.

Landvik J.Y., Mangerud Y., Salvigsen O. Glacial history and permafrost in the Svalbard area / K. Senneset (ed.). Proceedings of the 5th International conference on permafrost. Trondheim: Tapir Publishers, 1988. Vol. 1. P. 194–198.

Liestøl O. Pingos, springs, and permafrost in Spitsbergen // Årbok 1975. Norsk Polarinstittutt, 1977. P. 7–29.

*N.E. DEMIDOV, S.R. VERKULICH, E.S. KARAEVSKAYA,
A.L. NIKULINA, L.M. SAVATYUGIN*

FIRST RESULTS OF PERMAFROST MONITORING ON THE CRYOSPHERIC SITE OF RUSSIAN SCIENTIFIC CENTER ON SPITSBERGEN (RSCS)

The system of long-term permafrost observations was organised on the cryospheric site of Russian Scientific Center on Spitsbergen in summer 2016. The monitoring site is established in the vicinity of mining settlement Barentsburg on a sequence of Holocene marine terraces. The core drilling showed that the thickness of gravel sands and clays with massive and schlieren cryostructure forming the accumulative terraces is of 2–7 m. Cretaceous and Neocene fractured sandstones and mudstones underlie them. Automated thermistor cables were installed in two boreholes to monitor the temperature on the depth of zero annual amplitude and seasonal distribution of zero-degree isotherm. The temperature $-2,37^{\circ}\text{C}$ was measured at 15 m depth. The thickness of active layer measured at ten meter net on the observational site of 100×100 m varied from 1,15 to 2,60 m with average of 1,56 m. Chemical analysis of aqueous extract revealed a geochemical barrier at 0,8–1,6 m below permafrost upper boundary in the period of maximum thawing, which apparently marks maximum seasonal thaw depth during the Holocene climatic optimum. In this paper recommendations on continuing and extending of pilot permafrost dynamic observations on Spitsbergen are given.

Keywords: permafrost, Spitsbergen, active layer.