ВОЗОБНОВЛЕНИЕ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА ЛЕДНИКАХ СЕВЕРНОЙ ЗЕМЛИ

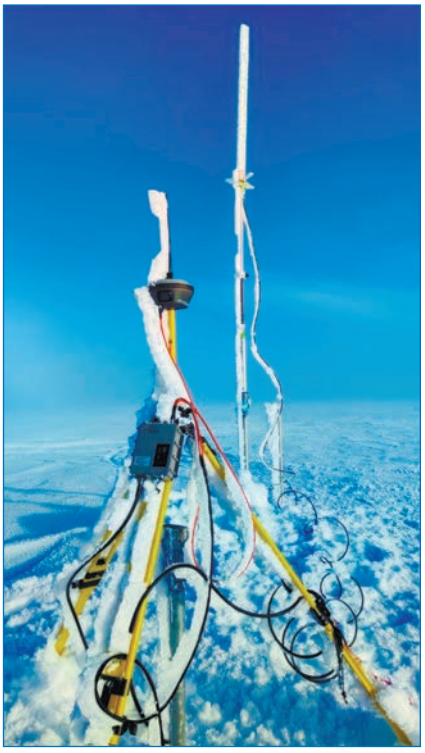
История исследования ледников Северной Земли учеными ААНИИ насчитывает уже более 60 лет. Сезонные экспедиции, проведенные в 60-х годах прошлого века, позволили получить первые данные о балансе массы некоторых ледников, их движении и продуцировании айсбергов. В дальнейшем масштаб изучения оледенения островов архипелага возрастал, и в 1974 году на леднике Вавилова (о. Октябрьской Революции) усилиями Л.С. Говорухи был организован первый круглогодичный гляциологический стационар в Российской Арктике «Купол Вавилова», просуществовавший до 1989 года. На стационаре выполнялись комплексные исследования природной среды архипелага, среди которых ведущая роль отводилась изучению баланса массы, процессам снегонакопления и фирнообразования на леднике. Отдельным направлением работ было бурение ледниковых толщ, предоставившее уникальные данные о мощности и строении ледников Вавилова и Академии Наук, а также сведения о температуре льда и строении пород ложа ледников.

Наряду с традиционными гляциологическими измерениями уже в 1968 году на архипелаге было проведено радиозондирование полярных ледников. Тогда радиофизический отряд ААНИИ, входивший в состав высокоширотной воздушной экспедиции «Север-20», получил с борта самолета Ли-2 первые сведения о глубинах ледников Пионер, Русанова, Альбанова, Вавилова, Академии Наук, Шмидта и Ушакова. Для этих целей был использован специально разработанный с учетом специфики неглубоких ледников радиолокатор с рабочей частотой 100 МГц и длительностью импульса 0,3 мкс. Данный тип локатора, положительно зарекомендовавший себя при рекогносцировочных работах, использовался впоследствии и при наземной съемке. Выполненные исследования стали первым примером использования радиозондирования в Российской Арктике.

В 1974–1975 годах усилиями ученых ААНИИ В.В. Богородского, Б.А. Федорова, В.И. Боярского были продолжены радиогляциологические исследования ледников архипелага в наземном и воздушном исполнении, позволившие получить достоверные сведения о глубине и строении ложа ледников. На леднике Вавилова была выполнена подробная съемка подледного ложа, что позволило оценить объем ледника и величину его водозапаса. Также для определения средней скорости распространения электромагнитных волн во льду, непосредственно влияющей на расчет толщины ледников, были проведены первые эксперименты по наклонному радиозондированию. Вместе с тем ледники наиболее южного острова архипелага, о. Большевик, не были охвачены радиолокационной съемкой, что объясняется прежде всего их отдаленностью от работавшего в то время стационара на о. Октябрьской Революции.

Единственная масштабная радиолокационная съемка всех основных ледников была осуществлена в апреле 1997 года британскими гляциологами из Ин-

Рис. 1. Георадар ОКО-3 с антенным блоком Тритон-М 50 МГц и ГНСС приемники EFT M4, применяемые при зондировании ледников



ститута полярных исследований имени Скотта и гляциологического центра университета г. Бристоль совместно с Институтом географии РАН. Исследования выполнялись с применением радиолокационной аппаратуры с антенным блоком 100 МГц, установленных на борту вертолета Ми-8. Расстояние между точками зондирований составляло около 150 м. Несмотря на большой объем полученных профильных данных (более 4,4 тысяч погонных км), ледники о. Большевик вновь оказались слабо охвачены съемкой. На основных ледниках Семенова-Тян-Шанского и Ленинградский было выполнено всего по одному профилю через центральные части ледников. На небольших ледниках острова съемка также ограничивалась одним профилем или вообще не проводилась.

В XXI веке радиолокационные исследования на архипелаге были продолжены, но не носили систематического характера и в основном были сосредоточены в районе ледника Вавилова, где в это время наблюдалась активная фаза подвижки западной части ледника с выдвижением в море крупной лопасти и повышенным айсбергообразованием. В то же время с началом работы научного стационара «Ледовая база Мыс Баранова» и организацией в 2014 году гляциологических наблюдений на ледниках Мушкетова и Семенова-Тян-Шанского появилась необходимость в восполнении этого пробела и дополнении имеющихся прямых наблюдений за балансом их массы радиолокационными исследованиями. Эти работы призваны определить толщину и объем ледников, морфологию их ложа, а также оценить толщину и границы распространения фирновой области в верхней части ледников.

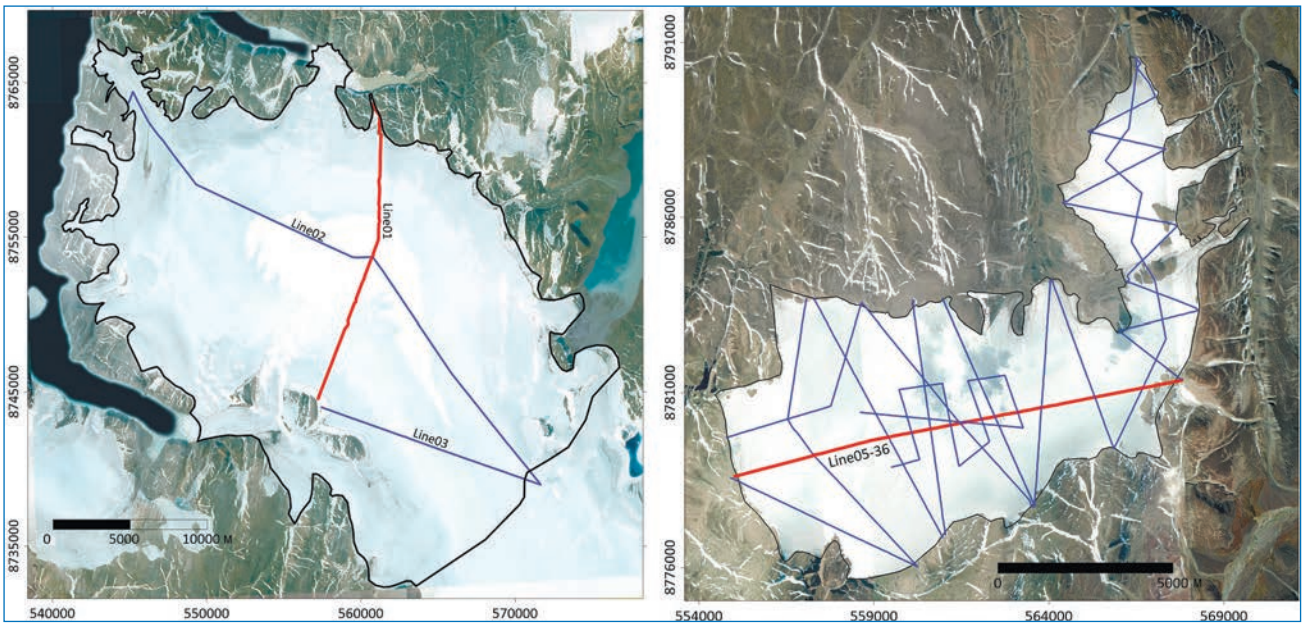
С этой целью в апреле–мае 2025 года гляциологическим отрядом сезонной экспедиции «Север-2025» были организованы и выполнены детальные наземные радиолокационные исследования ледников Мушкетова и Семенова-Тян-Шанского. Для исследований был использован георадар ОКО-3 (Москва, Россия) с антенными блоками Тритон-М частотой 50 и 100 МГц. Для привязки получаемых данных использовался комплект геодезической аппаратуры (ГНСС система) EFT M4 с внешним радиомодемом EFT RM1, работавший в режиме RTK (Real-Time Kinematic) и позволявший получать высокоточные координаты на удалении до 15 км от базовой станции непосредственно в ходе перемещения по профилям. В процессе измерений оборудование, размещенное на лыжах, перемещалось по заранее размеченному профилю при помощи снегохода со скоростью 5–10 км/ч. При этом каждая трасса получаемой радарограммы привязывалась с помощью приемника ГНСС. Шаг съемки при профилировании составлял от 0,25 до 3 м, в зависимости от выбранных параметров записи.

В ходе работ на леднике Мушкетова выполнено более 126 погонных км профилей, покрывающих всю доступную часть ледника относительно равномерной сетью. На леднике Семенова-Тян-Шанского выполнено три профиля общей длиной более 76 погонных км через центральную часть ледника, в том числе по линии размещения гляциологических реек. Также положение продольных профилей на обоих ледниках частично совпадает с выполненным в 1997 году аэрозондированием, что в дальнейшем позволит сопоставить разновременные съемки и проследить изменения, происходящие с ледниками.

Предварительная обработка данных показала, что на леднике Семенова-Тян-Шанского максимальная зарегистрированная толщина льда превышает 410 м, а положение ледораздела смещено относительно его водораздела. Относительно слабо расчлененное ложе ледника расположено на высотах 200–450 м, за исключением выводной части на его западной оконечности, где ложе располагается ниже уровня моря. На леднике Мушкетова максимальная зарегистрированная толщина льда составила более 270 м. Ложе ледника, гораздо более изрезанное, расположено на высотах 250–450 м и имеет несколько вытянутых врезов субмеридионального простирания. В краевых частях обоих ледников на радарограммах отмечено внедрение в толщу льда моренного материала, в некоторых местах выходящего на поверхность. Признаков подледниковых или внутриледниковых каналов стока талых вод не обнаружено.

Дальнейшая обработка данных позволит построить подробную карту подледникового ложа ледника Мушке-

Рис. 2. Схема радиолокационных профилей на ледниках Семенова-Тян-Шанского и Мушкетова. Красным цветом отмечены продольные профили, представленные на рис. 3



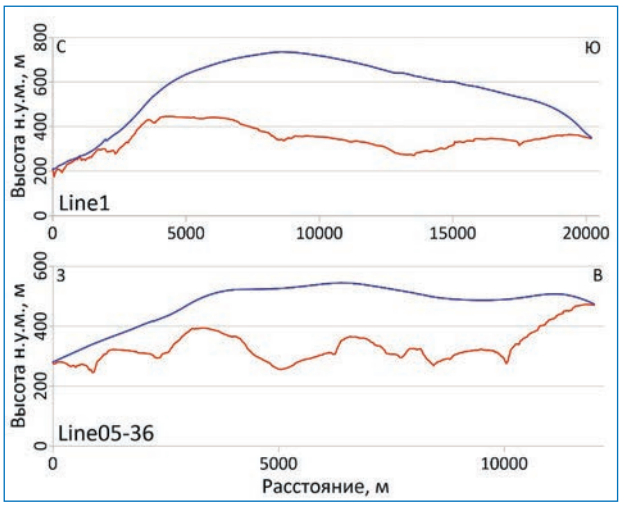


Рис. 3. Профиль поверхности и ложа ледника Семенова-Тян-Шанского (вверху) и ледника Мушкетова (внизу)

това, рассчитать его объем, уточнить общий водозапас ледника и станет фактической основой для моделирования оледенения всего архипелага. Сравнение результатов радиогляциологических исследований 1997 и 2025 годов позволит оценить изменения толщины ледников Мушкетова и Семенова-Тян-Шанского за последние десятилетия.

Полученные радиолокационные данные являются первыми подробными исследованиями ледников о. Большевик, выполненными на современном техническом уровне с применением высокоточной навигации. Дальнейшие полевые исследования будут направлены на более детальное изучение строения ледника Семенова-Тян-Шанского и его выводных частей, а также на определение скоростного строения близлежащих ледников.

А.Л. Борисик, С.Р. Веркулич, И.С. Ежиков, Н.М. Кузнецов, Е.И. Овсюков, В.Т. Соколов, А.В. Терехов (ААНИИ).
Фото А.Л. Борисика, Е.И. Овсюкова

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ДИНАМИКА ГРУНТОВЫХ ПРОСАДОК НА ТЕРРИТОРИИ НИС «ЛЕДОВАЯ БАЗА МЫС БАРАНОВА»

Острова архипелага Северная Земля — один из наиболее высокоширотных регионов, на территории которого редко наблюдались просадки грунтов, связанные с динамикой криогенных процессов. Этому способствовали краткость сезонов положительных температур, медленный сход снежного покрова и невысокая льдистость рыхлых отложений. Тем не менее в последние пять лет коллективы зимовок и сезонных исследовательских групп стали отмечать значительные преобразования рельефа поверхности на территории научно-исследовательского стационара (НИС) «Ледовая база Мыс Баранова». Они выражались в относительно быстром (от нескольких суток до пары недель) развитии локальных понижений на ранее относительно ровных участках земной поверхности. Глубина понижений варьировала от первых сантиметров до полуметра, при средней площади 0,6–1,3 м^2. Этими процессами охватывались площади от 17 м^2 до 1400 м^2. Последствия развития просадочных явлений усложняли передвижение по территории научно-исследовательской станции, как пешком, так и на технике, увеличивали риски отказов водоводов, теплотрасс и электрокоммуникаций поверхностного заложения, снижали стабильность оснований жилых и технических сооружений.

Настоящее исследование преследовало цели выявления условий, способствующих развитию криогенных просадок на территории НИС «Ледовая база Мыс Баранова» и разработки предложений по организации мониторинга этих неблагоприятных явлений. Для этого в сезон 2025 года были проведены замеры морфометрических показателей новообразованных просадок. Установлены сроки и оценена скорость роста просадочных понижений. Закартографированы участки развития просадок прошлых лет, и зафиксированы границы площадей текущего года. Также были использованы данные мониторинга развития сезонно-талого слоя за период 2017–2025 годов по двум грунтовым мерзлотомерам, расположенным в непосредственной близости от территории НИС.

«Ледовая база Мыс Баранова» расположена в северной части острова Большевик, на берегу пролива Шокальского. Рельеф окружающих территорий можно охарактеризовать как слабоприподнятые морские равнины, на скальном цоколе коренных пород, перекрытом слоем грубообломочного криогенного элювия, с фрагментарными участками дисперсных ледниково-морских и собственно морских отложений. Почвенный покров слаборазвит и фрагментарен. Его пространственную структуру составляют комплексы маломощных криоземов на участках пятнообразования и примитивных органогенных почв под подушками мха, фрагментарно распределенными среди каменистых развалов. Растительность изучаемой территории характерна для условий арктических тундр центральносибирского сектора Арктики. Растительный покров крайне фрагментарен и приурочен к ложбинам стока талых вод. Наиболее распространены: незабудочник волосистый (Eritrichium villosum), новосиверсия ледяная (Novosieversia glacialis), мак полярный (Papaver radicatum), фипсия холодолюбивая (Phippsia algida), звездчатка Эдвардса (Stellaria edwardsii), ясколка Баяльницкого (Cerastium bialynickyi), камнеломка северная (Saxifraga hyperborea), камнеломка поникающая (Saxifraga ceruna), крупка ложноволосистая (Draba pseudopoliosa), ожика спутанная (Luzula confusa), лисохвост альпийский (Alopecurus alpinus). Цветковые растения, за исключением полярных маков, предпочитают произрастать на ранее развившихся пятнах мхов. Полярные маки осваивают пятна суглинистых грунтов, перемещенных к дневной поверхности процессами криотурбации сезонно-талого слоя (см.: Матвеева Н.В. Растительность южной части острова Большевик // Растительность России. 2006. № 8. С. 3–87).

Наиболее активно процессы формирования криогенных просадок на территории НИС «Ледовая база Мыс Баранова» происходили в 2020 и 2025 годах. На рис. 1 представлен общий вид последствий развития просадочных процессов в 2025 году, за три дня до окончания