

Рис. 3. Распределение сплоченности (слева) и толщины льда (справа) по всему пути следования экспедиции во льдах

Наблюдения были открыты 13.09.2021 в 13:07 UTC в непосредственной близости от кромки льдов (в точке с координатами 80°53' с. ш. 71°24' в. д.) и продолжались непрерывно по ходу всего движения судна во льдах с перерывами только в нескольких непродолжительных выходах на чистую воду: 16–19.09.2021, 07–08.10.2021, 11–14.10.2021. Ледовые наблюдения завершились с выходом на чистую воду в Карском море (15 октября в точке с координатами 81°32' в. д. 76°43' с. ш.). Результатом визуальных наблюдений стало выделение 612 однородных ледовых зон по пути следования экспедиции. Ледовую обстановку на пути плавания в большинстве случаев можно охарактеризовать как сложную. На рис. 3 приведено распределение сплоченности и повторяемость толщины льда.

Как видно из гистограммы, 66 % пути во льдах были пройдены во льду сплоченностью 10 баллов. Выделение 16 % на сплоченность 0 (от 0 до 1) баллов связано с наличием по пути следования довольно протяженных зон с отдельно плавающими льдинами, сплоченность в которых обычно определяется как 0,1 балла. Поскольку моментов пересечения кромки, где обычно отмечаются такие зоны, было несколько, на сплоченность льда от 0 до 1 балла приходится такой значительный процент протяженности пути.

Высокая повторяемость небольших толщин льда (до 30 см) объясняется тем, что визуально толщина льда оценивается только по пути плавания, для которого характерен выбор более легких условий, с наличием разводий, разрывов, зон с преобладанием молодого льда. Так, повторяемость льда с толщиной 0–10 см в 37 % объясняется отнесением к этой категории начальных видов льда, таких как сало или ледяные иглы, которые могут занимать обширные акватории в прикормочных зонах, а также ниласа, встречавшегося довольно часто, поскольку шел активный процесс ледообразования, в том числе в разводьях, по которым двигалось судно. Толщина остаточного льда варьировала от 30–50 см до свыше 160 см, в отдельных случаях (торосистые образования) свыше 300 см. В целом по 9 % приходится на толщину льда 30–50 и 50–70 см (на каждую градацию), на толщину свыше 70 см приходится 8 % протяженности пути.

В ходе наблюдений лед оценивался по пути и по району плавания, однако в большинстве расчетов используются только оценки по пути плавания, поскольку

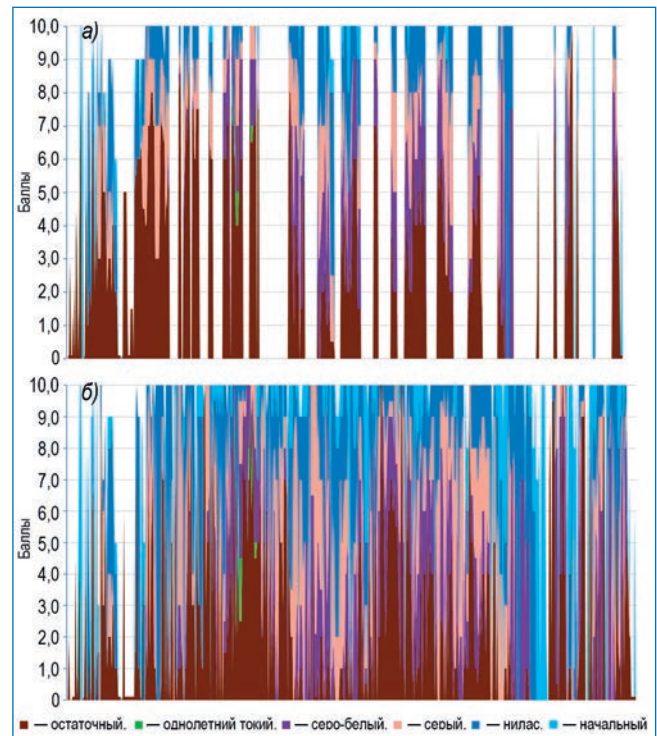


Рис. 4. Однородные ледовые зоны по маршруту следования экспедиции, описанные по району (а) и по пути (б) следования

данные по району имеют большое количество пропусков из-за плохой видимости и ночного времени. Тем не менее, поскольку судно выбирает более легкие условия для продвижения, лед по району может наблюдаться более тяжелый, чем по пути.

На рис. 4 можно оценить изменения ледовых условий по всему маршруту следования, наблюдавшихся по пути и по району. Даже при наличии пропусков в наблюдениях по району заметно большее количество остаточных льдов, чем по пути следования, что характеризует ледовые условия по району как более тяжелые, чем отмечающиеся по пути.

Были организованы три ледовые станции, в рамках которых было установлено три ИТР-буя (Ice Tethered Profiler), два ледовых масс-балансовых буя IMBV, проведены подспутниковые эксперименты определения толщины ледяного покрова с помощью пассивного микроволнового радиометра (PMR), аналогичного установленному на спутнике AMSR2, отобраны пробы снега и морского льда на гидрохимический анализ, проведен океанографический подледный эксперимент по измерению тонкой структуры температуры верхнего слоя океана непосредственно подо льдом.

*Н.А. Куссе-Тюз, Е.В. Блошкина,
И.А. Гангнус, А.Б. Тимофеева (АНИИ)*

КОМПЛЕКСНЫЕ ИНЖЕНЕРНЫЕ ИЗЫСКАНИЯ В ОАЗИСЕ ШИРМАХЕРА (ЗЕМЛЯ КОРОЛЕВЫ МОД, ВОСТОЧНАЯ АНТАРКТИДА) В СЕЗОН 67-Й РАЭ

В ходе летнего полевого сезона 67-й РАЭ в ноябре и декабре 2021 года на посадочной площадке станции Новолазаревская (Земля Королевы Мод, Восточная Антарктида), озерах и ледниках оазиса Ширмахера, а так-

же на участке трассы следования санно-гусеничного похода в сторону барьера выполнялись комплексные геофизические, буровые и геодезические работы. Их основной задачей являлось обеспечение безопасности

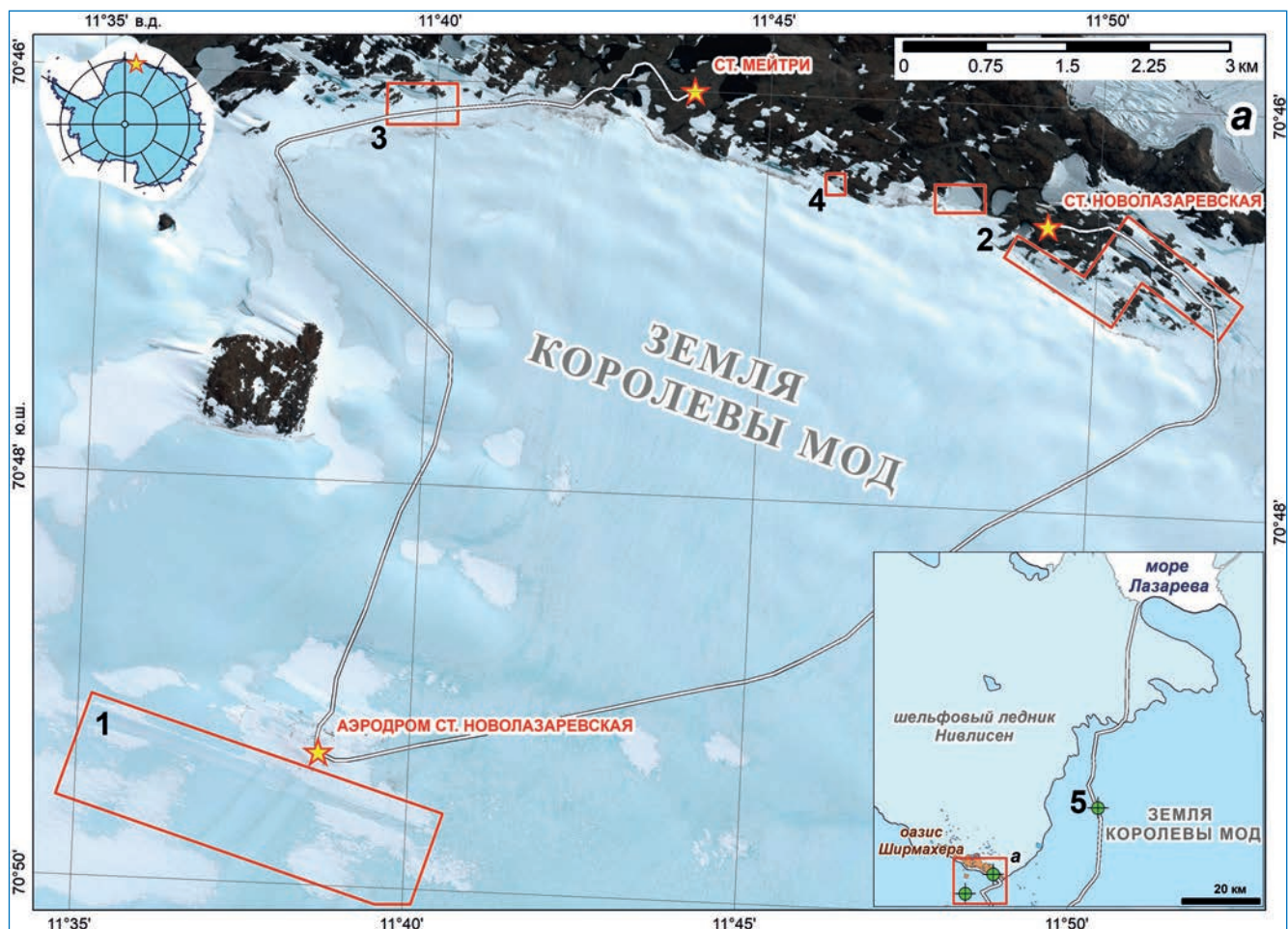


Рис. 1. Схема расположения участков работ:

1 — аэродром станции Новолазаревская; 2 — район станции Новолазаревская; 3 — район станции Мейтри; 4 — район ОМР на трещине в леднике; 5 — район зоны трещин на трассе следования СГП

логистических операций Российской антарктической экспедиции, а также проведение фундаментальных научных исследований, связанных с изучением динамики и теплофизических процессов в леднике, строения его приповерхностной части, а также процессов прорыва озер оазиса.

Инженерные изыскания на взлетно-посадочной полосе (ВПП), а также на ее боковых и торцевых зонах безопасности (район № 1, рис. 1) выполнялись в периоды с 30 октября по 5 ноября и с 14 по 15 декабря. Работы включали в себя георадарное профилирование, тахеометрическую съемку, шнековое бурение залеченных трещин и установку термоскопы для изучения теплофизических свойств этой части ледника при помощи математического моделирования.

В период пребывания отряда на станции Новолазаревская исследования были сосредоточены в районе озера Топографов и каскада озер Ледяное, Южное и Станционное, которые соединены между собой ледовыми гротами (район № 2, рис. 1). В состав работ входили георадарное профилирование озер и гротов (рис. 2а), тахеометрическая съемка района изысканий (рис. 2б) с привязкой к пунктам государственной геодезической сети для последующего составления высокоточных схем снежно-ледяной поверхности, придонного рельефа озер, глубин озер и толщин льда над ними, а также бурение под задачи термометрии (рис. 2в). Выполнение указанного комплекса работ необходимо для составления обоснованных рекомендаций по передвижению

в этом районе станционной и эксплуатации аэродромной транспортной техники.

Помимо вышеперечисленных работ проводились исследования на других гидрологических объектах для решения аналогичных задач. В частности, было выполнено исследование озер в районе индийской станции Мейтри (район № 3, рис. 1), а также снежно-ледяного склона покровного ледника, стекающего в безымянное озеро (район № 4, рис. 1). Интерес к последнему обусловлен наличием обширной быстрорастущей трещины, которая, вероятно, в ближайшее время станет причиной откола этой части ледника в озеро. Тем не менее в силу удаленности объекта от станции такое развитие событий не представляет опасности. С другой стороны, трещина, по-видимому образовавшаяся относительно недавно и проходящая через весь ледник, позволила визуально оценить его строение. В этом районе были выполнены опытно-методические работы по лоцированию трещины, а также выкопан шурф глубиной 1,4 м для составления плотностного и температурного разреза всей снежно-фирновой толщи, вплоть до льда.

В дополнение к перечисленному, 3 декабря были выполнены георадарные работы в зоне трещин, которая пересекает трассу следования санно-гусеничного похода (СГП) на барьер. Они носили рекогносцировочный характер. Их задача заключалась, главным образом, в выяснении объема и состава работ, если возникнет необходимость в обследовании этой территории под задачи обеспечения безопасности СГП (район № 5, рис. 1).

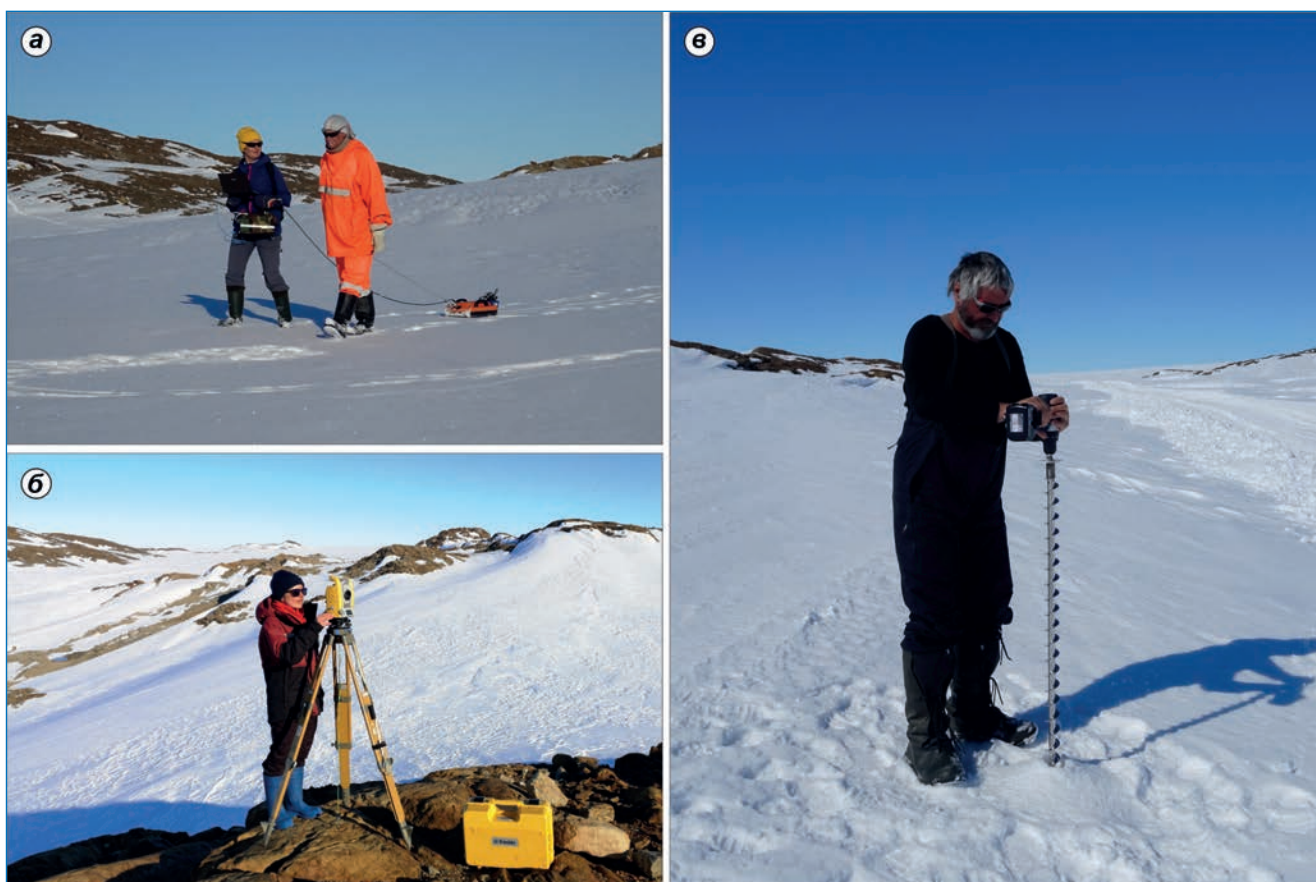


Рис. 2. Процесс выполнения георадарного профилирования (а), тахеометрической съемки (б) и шнекового бурения (в). Фото предоставлено авторами

Комплексные инженерные изыскания, выполненные на аэродроме, показали, что приповерхностная часть ледника в районе ВПП, а также ее боковых и торцевых зонах безопасности является целостной. Полости, которые представляют опасность для взлета и посадки воздушного судна, отсутствуют. На это указывают георадарные данные, полученные по профилю, расположенному вдоль ВПП. Он представлен на рис. 3. На временном разрезе наблюдается прямая волна 1, а также субгоризонтальные и волнообразные слои 2. Последние характерны для динамически спокойных областей ледника. Помимо этого имеются многочисленные дифрагированные волны 3, которые ассоциируются с залеченными трещинами. В основном их ширина составляет 10—15 см и лишь в отдельных местах превышает 20 см. Самые большие трещины были разбурены на глубину одного шнека (1 м). Судя по характеру заглупления бура, пустоты внутри них отсутствуют. Предполагается, что в период интенсивного приповерхностного таяния во время летнего сезона трещины были заполнены талой водой, которая затем замерзла. На это указывает внешний вид трещин: их прозрачность и выраженное отличие от окружающего ледника.

На временном разрезе визуально выявляются деформированные и смятые слои внутри ледника 4. Область их развития маркируется четко выраженными наклонными нарушениями слоев 5 (рис. 3). Это наводит на предположения о том, что на этом участке ВПП встречаются два ледовых потока. Их взаимодействие в краевых частях ледника деформирует его. При этом в центральной части ВПП деформации еще более значительные, что приводит к образованию выраженных вертикальных неоднородностей. Поскольку трещины на поверхности ледника не об-

разуются, на что указывают как визуальные наблюдения, так и геофизические данные, можно предположить, что скорости течения ледника здесь незначительные, а ее неравномерность не превышает предельных напряжений в леднике, которые приводят к образованию трещин. То есть характер взаимодействия указанных потоков приводит лишь к пластическим деформациям. Однако для более обоснованных выводов требуется углубленное изучение динамики ледника в этом районе.

Работы на озере Топографов, помимо общенаучного интереса, обусловлены решением ряда практических задач, которые включали в себя корректировку положения трассы следования СГП для безопасного движения транспортной техники, а также оценку возможности подъема тягача, провалившегося под лед в середине февраля 2021 года. Согласно полученным данным, средняя глубина озера составляет 8,3 м, при этом максимальное измеренное значение достигает 13,7 м. Площадь озера оценена величиной около 20,2 тыс. м² при объеме водной массы около 168 тыс. м³. Средняя толщина льда над озером составляет 6,6 м, при максимальном значении 12,1 м. Анализ временных георадарных разрезов указывает на то, что часть озера промерзла до дна. В его юго-западной части, вблизи скал, наоборот, наблюдаются небольшие значения толщины льда (около 2 м). В этом районе проходит трасса следования СГП, и именно здесь ушел под лед тягач. В месте его затопления наблюдается резкое увеличение глубины озера, что обусловлено расчлененным рельефом дна. Таким образом, для более безопасного движения транспортной техники целесообразно сместить трассу чуть севернее и проложить ее по береговой части, представленной скальными выходами, перекрытыми мощным (от 4 до

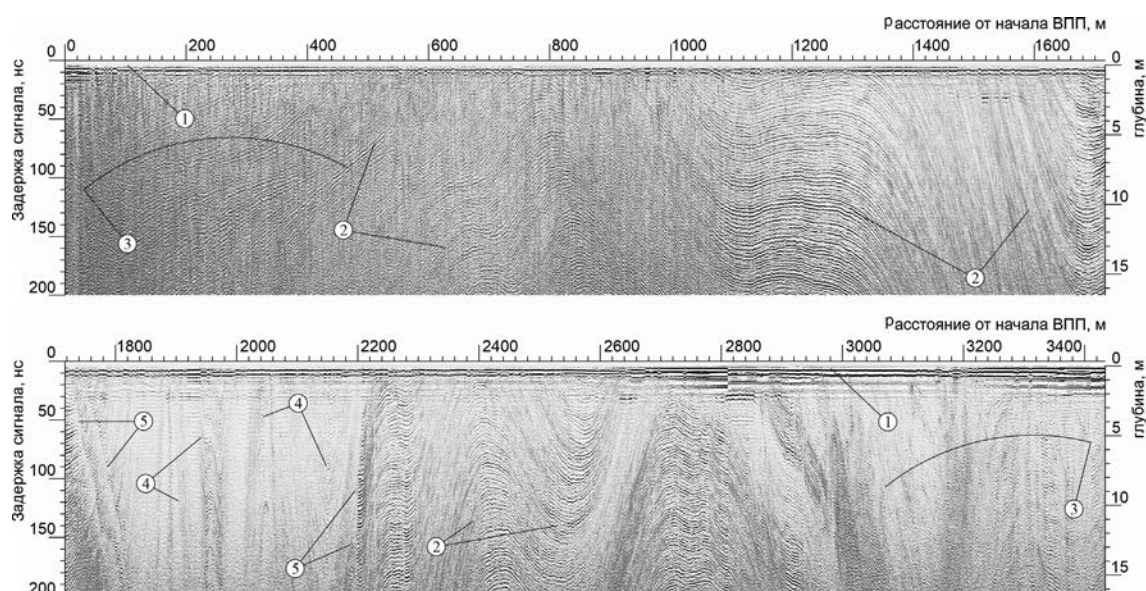


Рис. 3. Временной георадарный разрез по маршруту, расположенному вдоль середины ВПП:

1 — прямая волна; 2 — ненарушенные, субгоризонтальные или волнообразные внутренние слои в теле ледника; 3 — зоны «залеченных» трещин; 4 — сильно деформированные или смятые слои внутри ледника; 5 — зоны выраженных наклонных нарушений слоев

12 м) льдом, что позволит использовать эту удобную по местоположению трассу не только в зимний сезон.

Согласно полученным данным, утонувший тягач располагается на грунте, на глубине около 5 м от текущей дневной поверхности. При этом его верхняя часть, высотой около одного метра или чуть более, судя по георадарным разрезам, вмерзла в лед. Следует ожидать, что, поскольку коэффициент теплопроводности металла весьма значителен (у стали около 50 Вт/(м·К), для сравнения у льда 2,22 Вт/(м·К)), с течением времени тягач будет все больше и больше обрастать льдом. Это существенно усложнит процесс его подъема уже через год. Согласно полученным данным, на момент съемки тягач если и покрыт льдом, то пока еще в незначительном количестве. Более точно судить о процессах формирования льда на поверхности тягача можно после выполнения моделирования протекания теплофизических процессов в озере. Необходимые для этого измерения температуры воды в озере и во льду в ходе полевого сезона выполнены.

Еще одной задачей, нацеленной на изучение опасных гидрологических явлений, являются работы на каскаде озер Ледяное, Южное и Станционное (район № 1, рис. 1). Исследование прорывов озера Южное началось еще во времена строительства станции Новолазаревская, когда в летний период произошло стремительное повышение уровня воды на 3,5 м, что спровоцировало сброс водных масс через ледяную плотину. Поток воды устремился в район строительства станции. Чтобы спасти ее от затопления, был прорыт канал, отводящий паводковые воды в озеро Станционное. Позже было установлено, что озеро Ледяное, расположенное непосредственно у подножия материкового ледника, также является частью гидрологической системы. Оно располагается выше озер Южное и Станционное и аналогичным образом, через ледовый грот, сбрасывает излишки водных масс. Озеро Ледяное является наиболее трудным для исследования ввиду того, что практически не вскрывается ото льда. Этот факт объясняет плохую изученность водоема, даже несмотря на его большой вклад в прорыв всего каскада озер.

В ходе полевого сезона на озерах Южное и Ледяное была выполнена георадарная съемка на частотах

150 МГц и 400 МГц. На момент выполнения работ (начало декабря 2021 года) площадь озера Южное составила 8200 м². Акватория характеризуется длиной 155 м, при средней ширине около 65 м. Водоем имеет вытянутую форму и неизрезанные берега. Область наибольших глубин расположена в северо-восточной части вблизи снежно-ледяной перемычки, где из озера выходит канал стока, т. н. «большой грот». Максимальная мощность водного слоя составляет 2 м, а толщина льда 2,8 м. Остальная часть водоема мелководная (толщина водного слоя до 1 м). На основной его части мощность льда также незначительная, местами менее 50 см.

Озеро Ледяное является одним из крупнейших водоемов, расположенных рядом со станцией Новолазаревская. Благодаря результатам георадарного профилирования удалось точно определить его береговую линию и установить, что длина акватории составляет 250 м, при наибольшей ширине около 210 м. Площадь озера Ледяное оценивается в 163 тыс. м². В целом водоем имеет вытянутую овальную форму, а в его центре находится остров, сложенный характерными для этого места метаморфическими породами. Области наибольших глубин расположены вдоль ледника. Мощность водного слоя составляет более 15,5 м, а толщина льда изменяется от 3 до 6 м.

Помимо детального изучения озер исследованы ледяные гроты, соединяющие указанные озера. Получены данные о точном местоположении, конфигурации и морфометрических характеристиках как самих гротов, так и перекрывающей их толщи. Поскольку каналы являются унаследованными, в дальнейшем при помощи математического моделирования планируется оценить максимально возможные паводки на этих озерах и их последствия.

Рекогносцировочные работы, выполненные в зоне трещин, которая пересекает трассу следования СГП со станции на барьер, инструментально подтвердили первоначальное предположение о том, что трещины характеризуются ровными вертикальными или слегка наклонными стенками. Это обусловлено строением ледника, на котором отсутствует снежно-фирновая толща, что принципиально отличает его от районов станций Мирный и Прогресс. По-

этому формирование каверн, аналогичных тем, которые наблюдаются в зонах трещин в районе станций Мирный и Прогресс, является маловероятным. Для лучшей локализации распространения трещин в районе трассы СГП и их возможного развития требуется выполнение более масштабных работ, по аналогии с теми, которые выполнялись на вышеназванных станциях.

В ходе полевых работ выполнено: георадарное профилирование в объеме — 52,5 погонных километра; электромагнитных зондирований по системе ОГТ — 2; пробурено скважин — 15, из них для температурных измерений — 5; отработано пунктов тахеометрической съемки — 701.

Авторы благодарят начальника станции Новолазаревская 66-й РАЭ Д.Г. Серова, а также сотрудников

зимовочного состава станции и отдельно А.Г. Мельникова за огромную помощь в проведении полевых работ; сотрудника АНИИ В.В. Харитонову за предоставление бурового оборудования, а также сотрудников Института наук о Земле СПбГУ А.М. Белова, Т.В. Паршину, Г.В. Пряхину и С.В. Тюрина за предоставленную аппаратуру и помощь в ее подготовке к полевому сезону. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-05-00343 «Выявление особенностей протекания процесса прорывов озер оазисов Антарктиды на основе данных полевых исследований и математического моделирования».

С.В. Попов^{1,2}, М.П. Кашкевич², А.С. Боронина^{3,2}
(1 — АО «ПМГРЭ», 2 — СПбГУ, 3 — ГГИ, Санкт-Петербург)

РОССИЙСКАЯ СЕТЬ АВТОМАТИЧЕСКИХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ В АНТАРКТИКЕ

До настоящего времени на значительных пространствах Антарктиды, где нет полярных станций, отсутствуют регулярные метеорологические наблюдения, а в отдельных точках они были прерваны в связи с закрытием станций. Такое положение дел не позволяет обеспечить репрезентативность получаемой информации и достоверную прогнозируемость погодных явлений во всей Антарктике. Однако развитие современных технологий дало возможность в последние годы приблизиться к решению данной проблемы путем создания в Антарктике локальной сети автоматических метеорологических станций автономного базирования со спутниковым каналом передачи результатов наблюдений.

Основу сети автоматических метеорологических станций автономного базирования составила антарктическая метеогеофизическая станция с питанием от аккумуляторных батарей и спутниковым каналом связи. Такая станция была разработана в 2007 году российскими и финскими специалистами на базе оборудования MAWS 110 финской компании «Vaisala Oyj». Станция предназначена для выполнения автоматических измерений скорости и направления ветра, атмосферного давления, температуры и влажности воздуха, температуры подстилающей поверхности с накоплением и передачей полученных данных по спутниковому каналу связи. Измерения на станции и передача осуществлялись в основные синоптические сроки, в моменты времени, соответствующие действующему регламенту наблюдений конкретного метеорологического параметра. В перспективе предполагалось, что к такой станции могли бы подключаться геофизические датчики, однако на практике во всех образцах станций ограничивались вышеуказанным перечнем параметров, и эти станции фактически стали просто метеорологическими. Их метеорологические характеристики приведены в таблице, а электропитание осуществлялось от никель-кадмиевого аккумулятора с подзарядкой от солнечных батарей. При этом параметры солнечных батарей и аккумуляторов были подобраны таким образом, чтобы попытаться обеспечить надежную автономную работу станции минимум в течение всего срока ее службы продолжительностью пять лет.

Таблица

Характеристики метеорологической станции

| Наименование измеряемого параметра | Диапазон измерений | Погрешность |
|------------------------------------|--------------------|--------------|
| Скорость ветра W, м/с | 0 – 75 | ±(0,5+0,05W) |
| Направление ветра, град. | 0 – 360 | ±5 |
| Атмосферное давление, гПа | 650 – 1100 | ±0,5 |
| Температура воздуха, °С | –50 – 60 | ±0,2 |
| Относительная влажность воздуха, % | 0 – 100 | ±3 |

Для этого были применены наиболее экономичные в плане энергопотребления конструктивные решения, которые позволяли добиться того, чтобы разряд аккумуляторов в момент активной работы станции компенсировался их зарядкой от солнечных батарей в светлое время суток. Предполагалось, что во время полярной ночи продолжительностью до трех месяцев, когда невозможна подзарядка аккумуляторов, питающее напряжение не будет опускаться ниже 10,5 В. В результате, как показал многолетний опыт эксплуатации, даже при температурах воздуха ниже –45 °С обеспечивалась нормальная работоспособность всей станции, включая спутниковый передатчик.

Вся полученная измерительная и служебная техническая информация записывается во внутреннюю энергонезависимую память и передается по спутниковому каналу связи системы Iridium в формате SBD. Прием переданных данных производится на электронную почту с доступом по специальному паролю.

Первая российская автоматическая антарктическая метеорологическая станция на базе MAWS 110, установленная на полевой базе Молодежная, включает в себя следующее оборудование:

- логгер QML 201,
- комбинированный датчик WM30 скорости и направления ветра анемометрически-флюгерного принципа действия,
- кремниевый емкостной датчик атмосферного давления PMT16A,
- датчик HMP45D температуры платино-резистивного типа Pt 100 IEC 751 и относительной влажности воз-