

БУРЕНИЕ ЛЬДА НА ЗЕМЛЕ ПРИНЦЕССЫ ЕЛИЗАВЕТЫ (ВОСТОЧНАЯ АНТАРКТИДА) ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ГЕОЛОГИИ КОРЕННОГО ЛОЖА И ПОЗДНЕЧЕТВЕРТИЧНОГО КЛИМАТА

© 2024 г. Г. Л. Лейченко^{1,2}, П. Г. Талалай^{3,4*}, Н. Жан³, И. А. Абдрахманов¹, М. А. Воробьёв⁵,
Д. Гон³, Ю. Ли³, Я. Ли⁴, Ю. Сун⁴, И. И. Лаврентьев⁵, А. А. Екайкин⁶, Д. Р. Халимов⁶, Б. Ли⁴,
В. Я. Липенков⁶

¹Всероссийский научно-исследовательский институт геологии и минеральных ресурсов Мирового океана,
Санкт-Петербург, Россия;

²Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия;

³Цзилинский университет, Чанчунь, Китай;

⁴Китайский университет наук о Земле, Пекин, Китай;

⁵Институт географии РАН, Москва, Россия;

⁶Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: ptalalay@yandex.ru

Поступила 4 апреля 2024 г.

После доработки 5 апреля 2024 г.

Принята к печати 10 апреля 2024 г.

В сезон 2023/24 г. в северо-западной части Земли Принцессы Елизаветы выполнялось бурение ледника с целью отбора горных пород коренного ложа в рамках совместного российско-китайского проекта. Работы проводились в составе 69-й Российской антарктической экспедиции и 40-й Китайской антарктической научно-исследовательской экспедиции; использовалась мобильная буровая установка, разработанная в Цзилинском университете (Китай). Полученные материалы позволят установить изменение природной среды Восточной Антарктиды в позднечетвертичное время и выявить особенности геологического развития региона за период миллиарда лет назад.

Ключевые слова: Восточная Антарктида, бурение льда, коренное ложе, снежно-фирновая толща, радиолокация

DOI: 10.31857/S2076673424020125

Прямое изучение подледниковой среды — одна из наиболее важных задач настоящих и будущих исследований Антарктиды. Антарктический материк на 99,8% закрыт льдом, и все непосредственные знания о его геологическом строении основаны на изучении небольших горных выходов, обнажающихся из-под льда преимущественно в прибрежных районах. Геофизические методы (в первую очередь результаты аэромагнитных съёмок) дают косвенную информацию о строении земной коры Антарктиды и требуют подтверждения методами прямого опробования. Таким методом является бурение льда с отбором кернов коренного ложа. В настоящее время существует несколько амбициозных проектов подобного рода (например, американский проект «Rapid Access Ice Drilling» — RAID, проект Китайской экспедиции бурения в горах Гамбургцева), но до сих пор ни один из них не реализован, и ещё ни разу в Антарктиде не удалось выполнить целевой геологический отбор кернов коренного ложа, не считая опробования молодых осадков в подледниковых озёрах Западной

Антарктиды и тестового бурения вблизи научных станций (Talalay et al., 2021).

В декабре 2023 г. — феврале 2024 г. в северо-западной части Земли Принцессы Елизаветы в рамках совместного российско-китайского проекта было проведено керновое бурение, целью которого был отбор кернов льда и коренного ложа. Работы выполнялись в составе 69-й Российской антарктической экспедиции (РАЭ) и 40-й Китайской антарктической научно-исследовательской экспедиции. Бурение осуществлялось при помощи мобильной буровой установки, разработанной в Цзилинском университете (Китай) и предназначенной для проходки скважин колонковым способом во льду глубиной до 1400 м с проникновением в подледниковые породы на глубину до 1–2 м (Talalay et al., 2021).

Буровой комплекс состоял из двух передвижных модулей: собственно буровой общим весом около 25 тонн и вспомогательного бокса общим весом около 20 т. Проходка скважины включала в себя:

сухое колонковое бурение верхнего пористого снежно-фирнового слоя шнековым колонковым набором; заливку промывочной жидкости (авиационного керосина) на высоту бурового снаряда; колонковое бурение атмосферного льда с призабойной циркуляцией промывочной жидкостью резцовой буровой коронкой со среднесуточной производительностью 20–25 м/сут. Для бурения базального льда с минеральными включениями используется буровая коронка, армированная PDC резцами, а для бурения коренных пород — зубчатая импрегнированная алмазная коронка.

Работы обеспечивались при поддержке Российской Антарктической экспедиции Арктического и антарктического НИИ (ААНИИ).

Место бурения выбирали исходя, в первую очередь, из геологической целесообразности, т. е. необходимости получения ценного геологического материала, но при этом учитывались рельеф коренного ложа и толщина льда, а также возможности организации и проведения буровых работ в короткий летний период. Наиболее оптимальным со всех точек зрения оказался участок, расположенный на 30-м километре трассы санно-гусеничных походов (СГП) Прогресс — Восток (рис. 1).

Ранее здесь была обнаружена линейная высокоамплитудная магнитная аномалия, протянувшаяся в широтном направлении более чем на 500 км; она пересекает рифтовую зону ледника

Ламберта — Эймери с его флангами (Golynsky et al., 2018). Источник этой аномалии остаётся неизвестным, так как вдоль неё нет выходов горных пород. Предполагается, что аномалия маркирует ключевую структуру на границе тектонических провинций и, возможно, связана с тектоническим швом, сформировавшимся во время становления древнего суперконтинента Родиния при сращивании Индии и Восточной Антарктиды около 900–800 млн лет назад. Полевой лагерь, где выполняли ледовое бурение, получил название «Аномалия». В лагере размещалась буровая установка и мастерская, гляциологическая лаборатория, кернохранилище, жилые помещения и кают-компания (см. рис. 1).

В сезон 2022/23 г. (68 РАЭ) в северо-западной части Земли Принцессы Елизаветы была выполнена детальная магнитная и радиолокационная съёмка масштаба 1:100 000, на основании которой уточнялось положение скважины. Выбранное место расположено в центре магнитной аномалии, на вершине локального поднятия коренного ложа в точке с координатами 69°35.563' ю. ш.; 76°23.278' в. д. на высоте 680 м над ур. моря. Радиолокационные данные показали, что толщина льда здесь не превышает 560 м (рис. 2).

Актуальность изучения керна атмосферного льда связана с необходимостью реконструкции климатических условий (в первую очередь температуры воздуха и скорости снегонакопления) в Антарктике

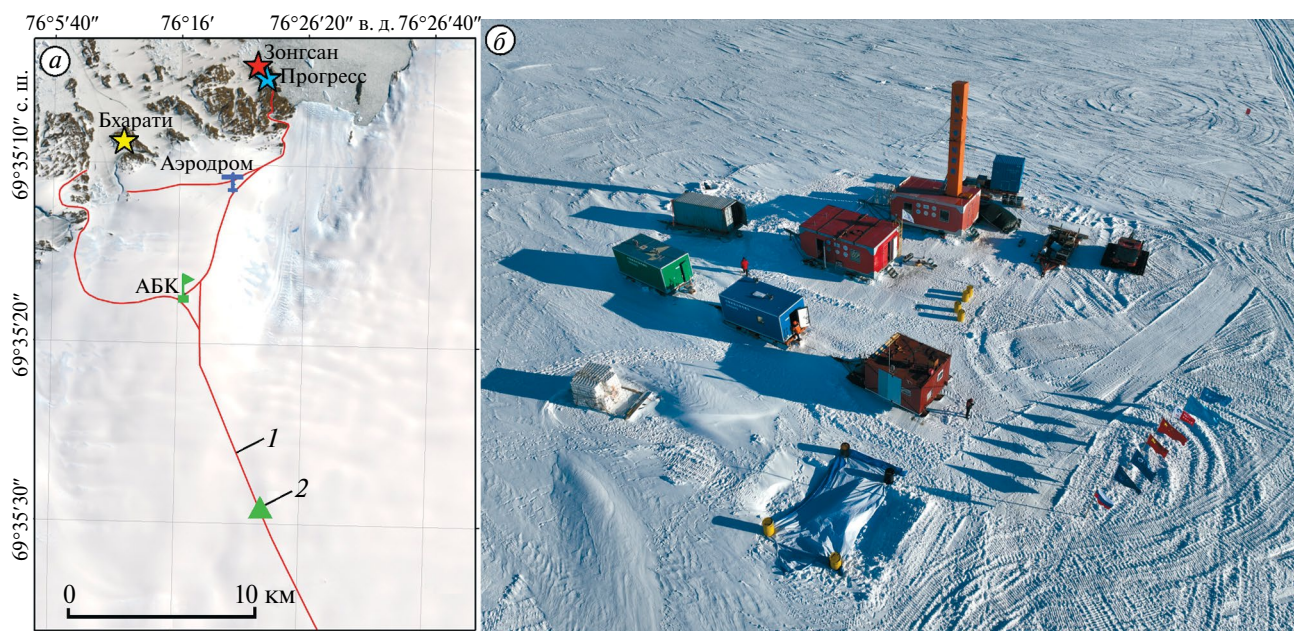


Рис. 1. Положение буровой скважины на леднике в северо-западной части Земли Принцессы Елизаветы (а): 1 — трасса СГП, 2 — скважина; звёздами показаны научные станции; полевой лагерь «Аномалия», расположенный на трассе Прогресс — Восток (трасса видна в правом верхнем углу фотографии) (б)

Fig. 1. Position of ice drilling site in the north-western Princess Elizabeth Land (а): 1 — Progress — Vostok route; 2 — the well; the stars show scientific stations; field camp “Anomaly” located near the Progress — Vostok logistic route seen in the upper-right corner of the image (б)

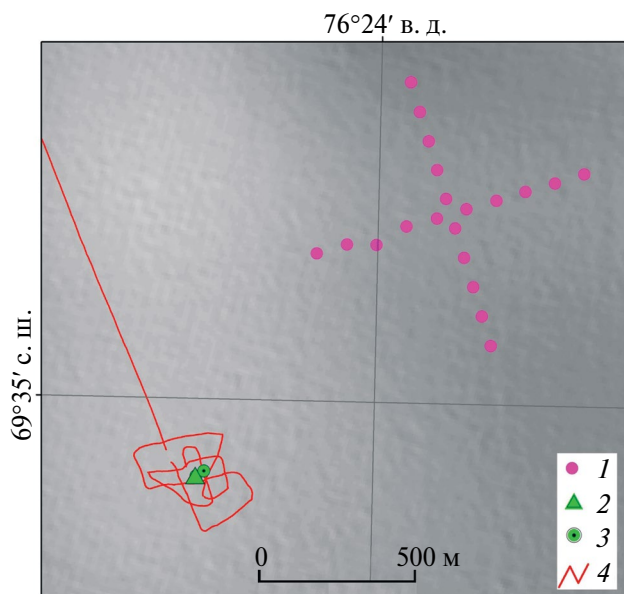


Рис. 2. Схема профилей радиолокационного зондирования и положение снегомерного полигона в районе буровой скважины на «Аномалии»: 1 — снегомерные веши; 2 — буровая; 3 — кернохранилище; 4 — профили радиолокационного зондирования

Fig. 2. The scheme of radar profiles in the vicinity of the drill site “Anomaly”: 1 — snow stakes; 2 — drill site; 3 — ice core storage; 4 — radar profiles

в течение последних 2000 лет и в более отдалённые эпохи. В недавнее время баланс массы Антарктиды довольно резко изменился в сторону отрицательных значений, и за последние 20 лет этот материк потерял порядка трёх триллионов тонн льда, что эквивалентно поднятию Мирового океана на 8,5 мм (Meredith et al., 2019). При этом, по данным наблюдений за последние 50 лет, наблюдается сильная региональная изменчивость климатических вариаций: существенное потепление в Западной Антарктиде сопровождается более стабильными условиями в Восточной (Steig et al., 2009; Jones et al., 2016). Было предположено, что отсутствие потепления (или даже незначительное похолодание) в Восточной Антарктиде объясняется менее частыми вторжениями тёплого влажного воздуха в центральные части восточно-антарктического плато (Nicolas, Bromwich, 2014). Понимание климатических изменений в Восточной Антарктиде, базирующееся на данных инструментальных наблюдений за последние 50 лет, особенно затруднено влиянием полярного вихря, поведение которого сильно менялось за последние 60 лет вследствие разрушения озонового слоя и стратосферно-тропосферного обмена (Fourge et al., 2018). В связи с этим невозможно понять ни естественную изменчивость климата Антарктиды, ни её реакцию на растущую концентрацию парниковых газов в атмосфере, основываясь лишь на доступных инструментальных данных. Существует

необходимость продлить климатические ряды на доинструментальный период. На решение этой задачи были направлены огромные международные усилия по бурению льда и извлечению ледяных кернов в различных районах Антарктиды. Измерение изотопного состава этих кернов с высоким разрешением вполне возможно, это надёжный метод для реконструкции прошлых изменений температуры в полярных районах (Jouzel et al., 2003).

Восточная Антарктида в зоне действия Российской антарктической экспедиции обеспечена палеоклиматическими данными относительно плохо. Лишь четыре ледяных керна охватывают весь 2000-летний период. Немногие доступные палеоклиматические записи позволяют реконструировать климатические изменения с разрешением не лучше 20 лет, что связано с большим количеством «стратиграфического» шума в климатической летописи, записанной в кернах.

Исследования нового ледяного керна, полученного в рамках настоящего проекта на склоне Восточно-Антарктического ледникового щита в пункте с повышенной аккумуляцией снега, внесут существенный вклад в решение перечисленных выше проблем. Высокая научная значимость и актуальность данного проекта подтверждается тем, что изучение климата Антарктиды в голоцене входит в число наиболее приоритетных направлений исследования Антарктики и Южного океана на период до 2035 г., которые были определены с использованием методики «сканирования горизонтов» (Horison Scan) Научным комитетом по исследованию Антарктики (SCAR) в 2014 г. (Kennicutt et al., 2015).

На первом этапе совместного российско-китайского проекта бурения был выполнен отбор керна снежно-фирнового слоя и атмосферного льда, изучена плотность снежно-фирнового слоя, мощность которого составила около 60 м; путём измерений координат фиксированной точки в течение полевого сезона установлена скорость течения льда на поверхности — 50–60 м/год. Кроме того, в районе бурового лагеря был разбит снегомерный полигон, состоящий из 20 вех (см. рис. 2). Повторное измерение их высоты в следующий сезон позволит надёжно определить современную скорость снегонакопления в этом районе.

В период проведения буровых работ в районе полевого лагеря были также проведены детальные радиолокационные исследования с целью уточнения толщины льда и условий на подошве ледника. Измерения проводились с помощью георадара ВИРЛ-7 с центральной частотой 20 МГц (Vasilenko et al., 2011). Компоненты радара (приёмник, передатчик, блок регистрации, источники питания, антенны и GPS) были размещены на двух санях-волокушах и перемещались одним оператором по нескольким профилям вокруг буровой на расстоянии 25–200 м (рис. 3).

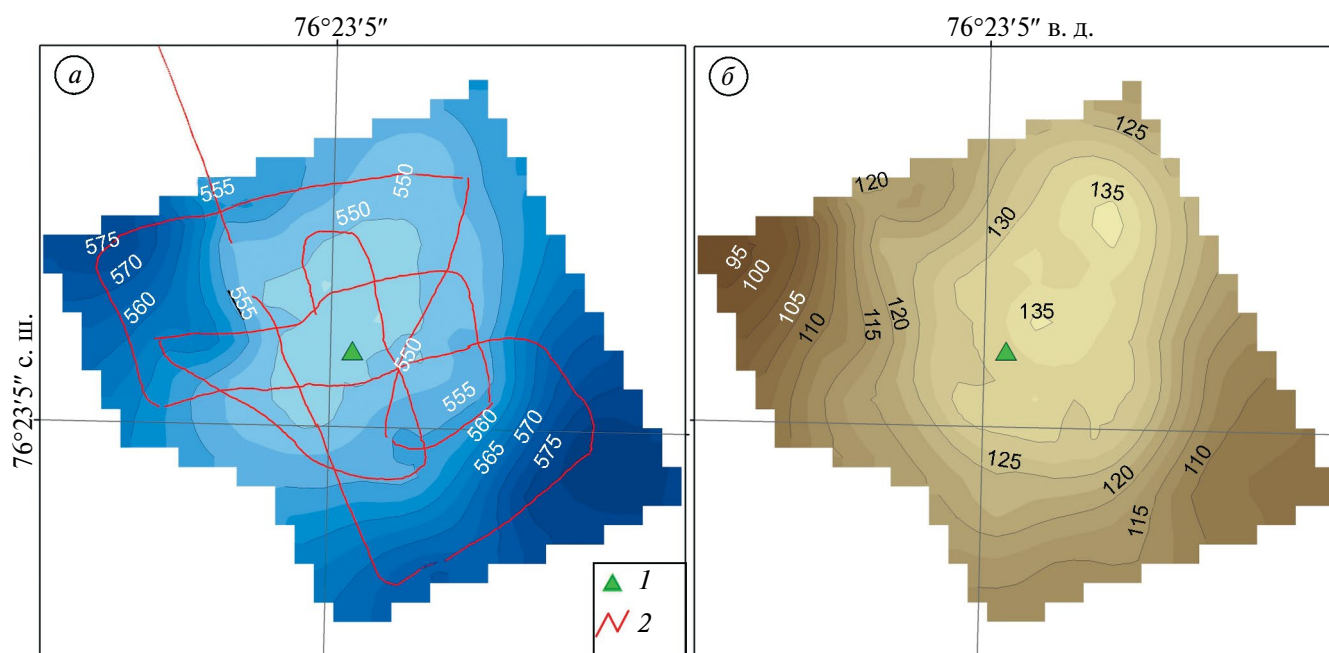


Рис. 3. Схема распределения толщины льда (а) и рельефа подлёдного ложа (б) в районе скважины: 1 – положение скважины; 2 – профили радиолокационного зондирования

Fig. 3. The scheme ice thickness distribution (а) and the subglacial topography (б) in the vicinity of the borehole: 1 – drill site; 2 – radar profiles

В общей сложности данные о характере рельефа подстилающего ложа и толщине льда были получены вдоль 2.5 км профилей. На радарограммах чётко виден отражённый от ложа сигнал, а также слоистость в верхней части разреза, соответствующая горизонтам отражения в фирновой толще. Для преобразования времени запаздывания сигналов в значения толщины использовалась средняя скорость распространения электромагнитных волн для всей толщи льда – 174 м/мкс, установленная с учётом данных бурения. Форма ложа – выпуклая в центре, как и предполагалось ранее, скважина находится в области наименьших значений толщины льда и наибольших абсолютных отметок высоты коренного ложа – 132 м над ур. моря. В среднем лёд в районе «Аномалии» имеет толщину 559 м (от 541 до 579 м), а высота подледникового рельефа варьирует от 93 до 136 м, в среднем составляя 120 м над ур. моря.

В следующем полевом сезоне (70 РАЭ) планируется продолжить буровые работы и выполнить скважинные геофизические измерения: термометрию, кавернометрию и инклинометрию. Измерение температуры в скважине чрезвычайно важно для определения динамических особенностей течения льда и оценки локального геотермального потока. Также предполагается сгустить и расширить сеть радиолокационных профилей в районе скважины и составить более детальную схему распределения толщины льда для моделирования скорости течения, распределения температуры и возраста льда во всей толще ледника.

Ледниковый керн в сезон 70-й РАЭ будет транспортирован на станцию Восток, где в гляциологической лаборатории бурового комплекса 5Г будет выполнена его первичная обработка – измерение электропроводности и отбор проб на изотопный и химический анализ. Измерения изотопного состава (^{18}O , δD и, в некоторых участках керна, $\delta^{17}\text{O}$) будут проведены в Лаборатории изменений климата и окружающей среды ААНИИ. Определение содержания нерастворимых частиц и ионов химических соединений будет выполнено в Международной лаборатории Палеоэкологических реконструкций Института географии РАН. Анализ электропроводности и изотопного состава позволит выявить границы годовых слоёв и, таким образом, построить надёжную хроностратиграфическую шкалу для всей толщи льда. По данным химического состава и по содержанию нерастворимых частиц возможно реконструировать поступление в атмосферу пыли, морской соли, вулканического материала и других аэрозолей.

Благодарности. Авторы благодарят Российскую и Китайскую антарктические экспедиции, а также руководство станций Прогресс и Зонгсан за логистическое обеспечение бурения. Бурение выполнялось в рамках Федерального проекта «Геология. Возрождение легенды» и государственного задания Агентства «Роснедра». Радиолокационное зондирование ледника проводилось в рамках Государственного задания Института географии РАН No FMGE-2019-0004. Изучение снежно-фирновой толщи и отбор

образцов для геохимических исследований проводились М. А. Воробьёвым в том числе в рамках Соглашения № 075-15-2021-599 от 08.06.2021.

Acknowledgements. Authors would like to thank the Russian and Chinese Antarctic Expeditions and the management of Progress and Zongsan stations for logistical support of drilling. Drilling was carried out within the framework of the Federal Project “Geology. Legend Revival” and the state assignment of the “Rosnedra” Agency. Radar measurements were carried out under the State Assignment No FMGE-2019-0004 of the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences. The study of snow and firn strata and sampling for geochemical studies was carried out by M. A. Vorobyev, among others, under Agreement No. 075-15-2021-599 dated 08.06.2021.

ЛИТЕРАТУРА REFERENCES

- Golynsky A. V., Ferraccioli F., Hong J. K., Golynsky D. A., von Frese R. R. B., Young D. A., Blankenship D. D., Holt J. W., Ivanov A. V., Kiselev A. V., Masolov V. N., Eagles G., Gohl K., Jokat W., Damaske D., Finn C., Aitken A., Bell R. E., Armadillo E., Jordan T. A., Greenbaum J. S., Bozzo E., Caneva G., Forsberg R., Ghidella M., Galindo-Zaldivar J., Bohoyo F., Martos Y. M., Nogi Y., Quartini E., Kim H. R., Roberts J. L.* New Magnetic Anomaly Map of the Antarctic // *Geophys. Research Letters*. 2018: 6437–6449. <https://doi.org/10.1029/2018GL078153>
- Jones T. R., Cuffey K. M., White J. W. C., Steig E. J., Buizert C., Markle B. R., McConnell J. R., Sigl M.* Water isotope diffusion in the WAIS Divide ice core during the Holocene and last glacial // *Journ. of Geophys. Research. Earth Surface*. 2016, 122: 290–309.
- Jouzel J., Vimeux F., Caillon N., Delaygue G., Hoffmann G., Masson-Delmotte V., Parrenin F.* Magnitude of isotope/temperature scaling for interpretation of central Antarctic ice cores // *Journ. of Geophys. Research*. 2003, 108. (D12, ACL 6): 1–10.
- Kennicutt II M. C. and many others.* A roadmap for Antarctic and Southern Ocean science for the next two decades and beyond // *Antarctic Science*. 2015, 27. (1): 3–18.
- Meredith M., Sommerkorn M., Cassotta S., Derksen C., Ekaykin A. A., Hollowed A., Kofinas G., Mackintosh A., Melbourne-Thomas J., Muelbert M. M. C., Ottersen G., Pritchard H., Schuur E. A. G.* Polar regions // IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate / Pörtner H.-O. and others. 2019: 203–320.
- Nicolas J. P., Bromwich D. H.* New Reconstruction of Antarctic Near-Surface Temperatures: Multidecadal Trends and Reliability of Global Reanalyses // *Journ. of Climate*. 2014, 27: 8070–8093.
- Steig E. J., Schneider D. P., Rutherford S. D., Mann M. E., Comiso J. C., Shindell D. T.* Warming of the Antarctic ice-sheet surface since the 1957 International Geophysical Year // *Nature*. 2009, 457: 459–463.
- Talalay P., Sun Y., Fan X., Zhang N., Cao P., Wang R., Markov F., Li X., Yang Y., Sysoev V., Liu Y., Liu Y., Wu W., Gong D.* Antarctic subglacial drilling rig: Part I. General concept and drilling shelter structure // *Annals of Glaciology*. 2021, 62 (84): 1–11. <https://doi.org/10.1017/aog.2020.37>
- Vasilenko E. V., Machio F., Lapazaran J. J., Navarro F. J., Frolovskiy K.* A compact lightweight multipurpose ground-penetrating radar for glaciological applications. *Journ. of Glaciology*. 2011, 57: 1113–1118. <https://doi.org/10.3189/002214311798843430>

Citation: Leitchenkov G. L., Talalay P. G., Zhang N., Abdrachmanov I. A., Vorobiev M. A., Gong D., Liu Y., Li Y., Sun Y., Lavrentiev I. I., Ekaykin A. A., Khalimov D. R., Li B., Lipenkov V. Y. Ice drilling on Princess Elizabeth Land (East Antarctica) aimed to study bedrock and Late Quaternary paleoclimate. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2024, 64 (2): 293–298. [In Russian]. doi 10.31857/S2076673424020125

Ice drilling on Princess Elizabeth Land (East Antarctica) aimed to study bedrock and Late Quaternary paleoclimate

G. L. Leitchenkov^{1,2}, P. G. Talalay^{3,4*}, N. Zhang³, I. A. Abdrachmanov¹, M. A. Vorobyov⁵, D. Gong³, Y. Liu³, Y. Li⁴, Y. Sun⁴, I. I. Lavrentiev⁵, A. A. Ekaykin⁶, D. R. Khalimov⁶, B. Li⁴, V. Y. Lipenkov⁶

¹*Institute for Geology and Mineral Resources of the World Ocean, St. Petersburg, Russia;*

²*Saint-Petersburg State University, St. Petersburg, Russia;*

³*Jilin University, Changchun, China;*

⁴*China University of Geosciences, Beijing, China;*

⁵*Institute of Geography, Russian Academy of Science, Moscow, Russia;*

⁶*Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia*

**e-mail: ptalalay@yandex.ru*

Received April 4, 2024 / Revised April 5, 2024 / Accepted April 10, 2024

Targeted bedrock sampling was carried out on Princess Elizabeth Land (30 km south of the coast, at 69.585591° S; 76.385165° E) by drilling through 545 m thick ice. The borehole was drilled using a new, modified version of the cable-suspended Ice and Bedrock Electromechanical Drill (IBED) designed by the Jilin University (China) and under a joint scientific project between VNIIOkeangeologia, Jilin University and China University of Geosciences (Beijing). The drill site is located on the axis of a high-amplitude linear magnetic anomaly that runs parallel to the coast for more than 500 km from Princess Elizabeth Land to Mac. Robertson Land. In the next Antarctic season, borehole geophysical logging will be conducted including temperature measurements for geothermal heat flux calculations.

Keywords: East Antarctica, ice drilling, bedrock, snow-firn layer, radio-echo sounding