

УДК 55.33

КОМПЛЕКСНЫЕ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ РАБОТЫ ГОРНОГО УНИВЕРСИТЕТА НА СТАНЦИЯХ ВОСТОК И ПРОГРЕСС В СЕЗОН 70-Й РОССИЙСКОЙ АНТАРКТИЧЕСКОЙ ЭКСПЕДИЦИИ

© 2025 г. А. В. Большунов*, С. А. Игнатьев, Д. В. Сербин, Г. Д. Горелик,
Н. С. Крикун, Д. Е. Ушаков, И. А. Бабенко, А. В. Запрудский

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

**e-mail: Bolshunov_AV@pers.spmi.ru*

Поступила 24.12.2024 г.

После доработки 09.01.2025 г.

Принята к печати 25.12.2024 г.

Статья посвящена комплексным научно-исследовательским работам на станциях Восток и Прогресс сотрудников Санкт-Петербургского горного университета в сезоне 70-й Российской антарктической экспедиции. Работы направлены на получение новых знаний о ледниковом покрове Восточной Антарктиды и структурно-геологических особенностях её прибрежных районов, а также на совершенствование методик, технологий и техники геолого-геофизических и буровых работ.

Ключевые слова: Восточная Антарктида, геолого-геофизические и буровые работы, кристаллический фундамент, фирн, лёд, физико-механические свойства, гамма-спектрометрия, магниторазведка, радиометрия, аэрофотосъёмка

DOI: 10.31857/S2076673425010134, EDN: GXTLOF

Сезон 70-й Российской антарктической экспедиции (РАЭ) для сотрудников Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II (далее Горный университет) уникальный – впервые научно-исследовательские работы проводятся на двух станциях Восток и Прогресс. Существует ряд представлений, согласно которым рифт Ламберта, расположенный недалеко от станции Прогресс, и озеро Восток могут быть если не сегментами одной глобальной геологической структуры (Filina et al., 2008; Isanina et al., 2009), то частью одной рифтовой системы (Голынский, 2009; Ferraccioli et al., 2011; Baranov, Morelli, 2023) (рис. 1).

В таком случае доказательство сингенетичности этих объектов позволит установить особенности их формирования и эволюции, а также взглянуть по-новому на историю геологического развития и термодинамических процессов не только Восточной Антарктиды, но и планеты в целом. С учётом того что территория рифта Ламберта является одной из наиболее обнажённых в пределах Восточной Антарктиды и позволяет проводить наблюдения *in situ*, не затрачивая огромные ресурсы на проведение буровых работ, данное утверждение приобретает особую актуальность.

На момент написания статьи одна группа в составе трёх сотрудников уже находилась на станции

Восток, куда прибыла 2 декабря 2024 г., а вторая группа в составе пяти сотрудников находилась на НЭС “Академик Федоров” и следовала на станцию Прогресс.

Программа работ на станции Восток включает не только традиционные прикладные исследования, направленные на разработку новых и совершенствование существующих технологий бурения ледников, но и фундаментальные – изучение физико-механических свойств фирна, атмосферного и озёрного льда.

Программа традиционных работ включает исследования следующих процессов: бурения колонковым электромеханическим снарядом КЭМС-135 скважины 5Г-5 с использованием кремнийорганической жидкости (ПМС-3); расширения скважины 5Г-5 механическим способом; разрушения фирна и льда резанием по керновому материалу; циклонного шламоулавливания. Из перечисленных исследований остановимся подробнее на бурении колонковым электромеханическим снарядом КЭМС-135 скважины 5Г-5 с использованием кремнийорганической жидкости (ПМС-3).

На сегодняшний день при бурении глубоких скважин в ледниках в качестве заливочной жидкости наиболее распространена смесь керосина и фреона; последний используется в качестве

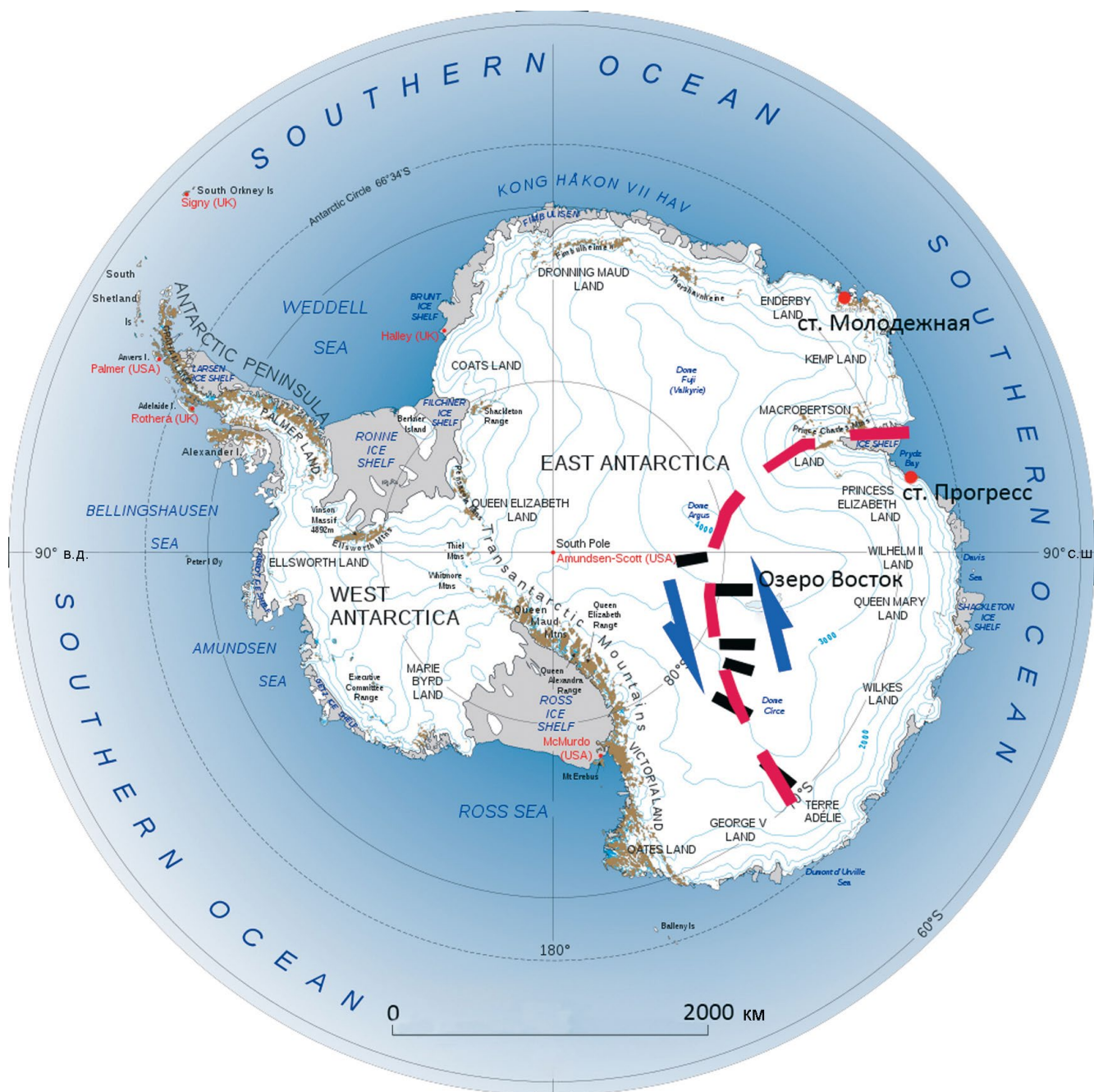


Рис. 1. Предполагаемая транстензионная модель деформирования Восточно-Антарктического кратона и схема расположения станций проведения работ (модифицировано из Cianfarra, Salvini, 2013)

Fig. 1. The proposed transtensional deformation model of the East Antarctic craton and the layout of the work stations (modified from Cianfarra, Salvini, 2013)

утяжелителя. В частности, при бурении скважины 5Г на станции Восток используется авиационный керосин Jet A-1 и фреон HCFC-141b. Эта смесь, по мнению экспертов, экологически не безопасна и поэтому её применение при бурении скважин доступа к подледниковым средам не рекомендуется (Zhou et al., 2024); в то же время использование

кремнийорганических жидкостей в качестве заливочных допускается (Triest, Alemany, 2014).

Любая заливочная жидкость, являющиеся основой эффективности очистки забоя от ледяного шлама, меняет свои плотностные и реологические свойства при изменении температуры и давления. Ни в одном из современных экспериментальных

стендах невозможно смоделировать процесс бурения реальным буровым снарядом в термобарических условиях скважины. Тем уникальнее эксперименты, запланированные в скважине 5Г-5.

Методика экспериментов, которые будут проводиться на забое скважины 5Г-5 (глубина по керну 3610 м, озёрный лёд), включает следующие этапы: 1) проведение геофизических исследований по всему стволу скважины (термометрия, барометрия, кавернометрия); 2) отбор проб заливочной жидкости (керосин с фреоном) многосекционным пробоотборником с призабойной зоны скважины; 3) исследование плотностных, реологических и химических свойств проб заливочной жидкости из призабойной зоны скважины; 4) доставка кремнийорганической жидкости (полиметилсилаксан, ПМС-3) на забой скважины; 5) отбор проб заливочной жидкости многосекционным пробоотборником с призабойной зоны скважины до бурения; 6) исследование плотностных, реологических и химических свойств проб заливочной жидкости; 7) бурение озёрного льда колонковым электромеханическим снарядом КЭМС-135 в среде кремнийорганической заливочной жидкости с контролем параметров процесса бурения и анализом, полученного кернового материала и ледяного шлама; 8) отбор проб заливочной жидкости многосекционным пробоотборником с призабойной зоны скважины после бурения; 9) исследование плотностных, реологических и химических свойств проб заливочной жидкости.

Запланировано несколько буровых рейсов с последующим отбором проб заливочной жидкости, реологические свойства которой будут изучаться на станции Восток, а химические — в лабораториях Горного университета.

На 15 декабря 2024 г. были выполнены геофизические исследования в скважине 5Г и отобраны с забоя пробы заливочной жидкости с глубины 3593 м, 3583 м, 3573 м по кабелю. При проведении работ по отбору проб использовался многосекционный пробоотборник разработки Горного университета (рис. 2). Проведены исследования плотностных свойств отобранных проб и эталонных образцов компонентов заливочной жидкости.

После долгого перерыва сотрудники Горного университета будут проводить на станции Восток работы фундаментального характера — изучение физико-механических свойств фирна, атмосферного и озёрного льда. Исследования в этой области важны для повышения достоверности модели строения системы «ледник — подледниковый водоём — коренные породы» и позволяют лучше понять механизмы взаимодействия между структурой льда и его механическими характеристиками, что актуально при проектировании нового оборудования



Рис. 2. Отбор проб заливочной жидкости: *а* — многосекционный пробоотборник с пробами заливочной жидкости, *б* — слив заливочной жидкости со второй секции пробоотборника

Fig. 2. Sampling of the borehole liquid: *a* — a multi-section sampler with samples of the borehole liquid, *b* — draining the borehole liquid from the second section of the sampler

для бурения глубоких скважин в Антарктиде. Исследования физико-механических свойств могут проводиться разрушающими или неразрушающими методами, по керновому материалу или в скважине (шурфе).

В период сезонных работ 70-й РАЭ на основе кернов льда из скважины 3Г-5Г и кернов фирна из неглубоких скважин VK 23-25 предполагается провести анализ структуры льда и фирна и изучить их твёрдость, прочность, плотность. Для проведения исследований на станцию Восток доставлено новое оборудование: прибор сосредоточенного нагружения ПСН-0.16.10 (разрушающий метод); ультразвуковой прибор для контроля прочности Пульсар-2.1 (неразрушающий метод).

На первом этапе запланированы исследования неразрушающим методом, а затем из изученного кернового материала будут подготовлены образцы геометрическими параметрами $35 \times 35 \times 35$ мм для исследования на приборе сосредоточенного нагружения ПСН-0.16.10. Между полученными результатами планируется установить зависимости, использование которых в дальнейшем позволит применять неразрушающий метод исследования и сохранить ценный керновый материал.

Работы на станции **Прогресс** (в пределах оазиса Холмы Ларсеманн) будут включать два основных блока: геологические и геофизические исследования. Важный этап будет включать последующую корреляцию полученных результатов с привлечением аэрогеодезической съёмки беспилотными летательными аппаратами (БПЛА) опорных обнажений с целью комплексного изучения особенностей геологического строения территории. Основная цель заключается в уточнении структурного строения района работ и вещественного состава горных пород: выделении пликативных и дизъюнктивных структур; определении их морфокинематических характеристик, а также элементов залегания, что необходимо для реконструкции тектонической эволюции региона.

Тектонические деформации планируется изучать на макро-, мезо- и микроуровне и, помимо полевых геологических наблюдений, сопровождать большим количеством подготовительных и камеральных работ. Полевой этап включает в себя следующее: 1) рекогносцировочные геологические маршруты (масштаб 1:25 000) для картирования и описания наиболее крупных тектонических нарушений (макроуровень); 2) первичную корреляцию полученных данных с различными информационными слоями, подобранными в ходе подготовительного этапа (с линеamentными схемами, полученными по космическим снимкам и потенциальным полям, с существующими тектоническими картами и др.) с целью выделения объектов для дальнейшего изучения; 3) аэрогеодезическую съёмку, оценку морфотектонических индексов с привлечением беспилотных летательных аппаратов для картирования дизъюнктивных структур по косвенным признакам; 4) увеличение плотности сети наблюдений (масштаб 1:5 000; 1:2 500) вдоль и в крест простираения зон закартированных (в ходе п. 1.1) разломов.

На текущем этапе выполняется фиксация и детальное описание трещин (элементы залегания, ширина, длина, густота, характер заполнения, наличие зон брекчирования, катаклаза и др.) (мезоуровень); описание и отбор ориентированных образцов вмещающих горных пород для последующего изготовления шлифов по трём взаимно перпендикулярным плоскостям и изучения их трещиноватости и структурно-текстурных

особенностей на микроуровне методом QMA (количественный минеральный анализ).

Исследование опорных обнажений будет реализовано независимо от первой задачи и включает в себя: 1) выделение наиболее представительных и крупных обнажений горных пород для дальнейших специализированных исследований; 2) фотофиксацию обнажений, детальное послойное описание (с учётом всех фациальных разновидностей пород, гипергенных изменений и др.), а также их опробование для проведения комплекса лабораторных исследований, в том числе оптико-микроскопических, электронно-микроскопических и изотопно-геохимических анализов; 3) полевую гамма-спектрометрию прибором МКСП-01 (ООО НТЦ “РАДЭК”, Россия) наиболее крупных обнажений и зон региональных разрывных нарушений для экспресс-анализа химического состава, оценки радиогенной составляющей и сравнения полученных результатов с лабораторными.

В ходе выполнения пунктов 1 и 2 и по результатам лабораторного изучения отобранных образцов горных пород будет составлен атлас магматитов. Планируются также электроразведочные работы с применением методов многоразностного бесконтактного электрического профилирования (аппаратурой БИКС, (ООО “СКБ СП”, Россия)) по профилям, выбранным в ходе рекогносцировочных маршрутов, а также площадные магнито-разведочные работы в масштабе 1:10 000 с магнитометрами MiniMag (ООО “Геодевайс”, Россия) в пределах полуострова Брокнес с целью сопровождения геологических исследований в рамках изучения особенностей тектонического строения района работ.

Благодарности. Авторы выражают глубокую благодарность Российской антарктической экспедиции за логистическую и инфраструктурную поддержку проводимых исследований. Исследование выполнено с помощью субсидии на выполнение государственного задания в сфере научной деятельности на 2024 г. № FSRW-2024-0003.

Acknowledgements. The authors express their deep gratitude to the Russian Antarctic Expedition for the logistical and infrastructural support of the ongoing research. The research was performed at the expense of the subsidy for the state assignment in the field of scientific activity for 2024 № FSRW-2024-0003.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Голынский А.В., Голынский Д.А. Рифтовые системы в тектонической структуре Восточной Антарктиды // Научные результаты российских геолого-геофизических исследований в Антарктике. 2009. Вып. 2. С. 132–162.

- Горелик Г.Д., Егоров А.С., Шуклин И.А., Ушаков Д.Е. Обоснование оптимального комплекса геофизических исследований глубинного строения района озера Восток // Горный журнал. 2024. № 9. С. 56–61.
<https://doi.org/10.17580/gzh.2024.09.09>
- Baranov A., Morelli A. The structure of sedimentary basins of Antarctica and a new three-layer sediment model // Tectonophysics. 2023. V. 846. 229662. ISSN 0040-1951. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4080330>
- Cianfarra P., Salvini F. Intraplate Transtensional Tectonics in the East Antarctic Craton: Insight from Buried Subglacial Bedrock in the Lake Vostok–Dome C Region // International Journal of Geosciences. 2013. V. 4. № 9. P. 1275–1284.
- Ferraccioli F. et al. East Antarctic rifting triggers uplift of the Gamburtsev Mountains // Nature. 2011. V. 479. № 7373. P. 388–392.
- Filina I., Blankenship D.D., Thoma M., Lukin V.V., Masolov V.N. & Sen M.K. New 3D bathymetry and sediment distribution in Lake Vostok: Implication for pre-glacial origin and numerical modeling of the internal processes within the lake // Earth and Planetary Science Letters. 2008. 276. P. 106–114.
- Isanina E., Krupnova N., Popov S., Masolov V., Lukin V. Deep structure of the Vostok Basin, East Antarctica as deduced from seismological observations // Geotektonika. 2009. 3. P. 45–50.
- Litvinenko V.S. Foreword: Sixty-year Russian history of Antarctic subglacial lake exploration and Arctic natural resource development // Geochemistry. 2020. V. 80. № 3. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2020.125652>
- Talalay P.G. Mechanical Ice Drilling Technology. Springer Singapore. 2016.
- Triest J., Alemany O. Drill fluid selection for the SUBGLACIOR probe: a review of silicone oil as a drill fluid // Annals of Glaciology. 2014; 55 (68). P. 311–321. <https://doi.org/10.3189/2014AoG68A028>
- Zhou Y., Cui X., Dai Z., Zhou X., Li L., Jiang S., Sun B. The Antarctic Subglacial Hydrological Environment and International Drilling Projects: A Review // Water. 2024. V. 16. P. 1111. <https://doi.org/10.3390/w16081111>

Citation: Bolshunov A.V., Ignatiev S.A., Serbin D.V., Gorelik G.D., Krikun N.S., Ushakov D.E., Babenko I.A., Zaprudsky A.V. Comprehensive research work of the Mining University at Vostok and Progress stations during the season of the 70th Russian Antarctic Expedition. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2025, 65 (1): 179–184. [In Russian]. doi: 10.31857/S2076673425010134

Comprehensive research work of the Mining University at Vostok and Progress stations during the season of the 70th Russian Antarctic Expedition

© 2025 A. V. Bolshunov[#], S. A. Ignatiev, D. V. Serbin, G. D. Gorelik,
N. S. Krikun, D. E. Ushakov, I. A. Babenko, A. V. Zaprudsky

Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia

[#]e-mail: Bolshunov_AV@pers.spmi.ru

Received December 24, 2024; revised January 9, 2025; accepted December 25, 2024

The study of the geological structure, dynamics of the ice sheet and the interaction of the subglacial systems of East Antarctica provides a unique opportunity to analyze the fundamental processes shaping the climate and geological evolution of our planet (Litvinenko, 2020). Conducting these studies is inextricably linked to the process of improving methods, technologies and techniques of geological, geophysical and drilling operations (Gorelik, 2024; Talalay, 2016). During the season of the 70th Russian Antarctic Expedition (2024–2025), the staff of the Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University will carry out comprehensive research at the Vostok and Progress stations, including; the development of new and improvement of existing technologies for drilling glaciers, the study of the physical-mechanical properties of firn, atmospheric and lake ice; the study of structural geological features and reconstruction of the tectonic evolution of the coastal regions of East Antarctica.

Keywords: East Antarctica, geological, geophysical and drilling operations, crystalline basement, firn, ice, physico-mechanical properties, gamma-ray spectrometry, magnetic prospecting, radiometry, aerial photography

REFERENCES

- Golynsky A.V., Golynsky D.A.* Rift systems in the tectonic structure of East Antarctica. *Scientific results of Russian geological and geophysical research in Antarctica*. 2009, 2: 132–162 [In Russian].
- Gorelik G.D., Egorov A.S., Shuklin I.A., Ushakov D.E.* Substantiation of the optimal complex of geophysical studies of the deep structure of the Lake Vostok area. *Gorny Zhurnal*. 2024, 9: 56–61. <https://doi.org/10.17580/gzh.2024.09.09> [In Russian].
- Baranov A., Morelli A.* The structure of sedimentary basins of Antarctica and a new three-layer sediment model. *Tectonophysics*. 2023, 846. 229662. ISSN 0040-1951. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4080330>
- Cianfarra P., Salvini F.* Intraplate Transtensional Tectonics in the East Antarctic Craton: Insight from Buried Subglacial Bedrock in the Lake Vostok–Dome C Region. *International Journal of Geosciences*. 2013, 4(9): 1275–1284.
- Ferraccioli F. et al.* East Antarctic rifting triggers uplift of the Gamburtsev Mountains. *Nature*. 2011, 479 (7373): 388–392.
- Filina I., Blankenship D.D., Thoma M., Lukin V.V., Masolov V.N. & Sen M.K.* New 3D bathymetry and sediment distribution in Lake Vostok: Implication for pre-glacial origin and numerical modeling of the internal processes within the lake. *Earth and Planetary Science Letters*. 2008, 276: 106–114.
- Isanina E., Krupnova N., Popov S., Masolov V., Lukin V.* Deep structure of the Vostok Basin, East Antarctica as deduced from seismological observations. *Geotektonika*. 2009, 3: 45–50.
- Litvinenko V.S.* Foreword: Sixty-year Russian history of Antarctic subglacial lake exploration and Arctic natural resource development. *Geochemistry*. 2020: 80 (3). <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2020.125652>
- Talalay P.G.* Mechanical Ice Drilling Technology. Singapore: Springer. 2016.
- Triest J., Alemany O.* Drill fluid selection for the SUB-GLACIOR probe: a review of silicone oil as a drill fluid. *Annals of Glaciology*. 2014, 55 (68): 311–321. <https://doi.org/10.3189/2014AoG68A028>
- Zhou Y., Cui X., Dai Z., Zhou X., Li L., Jiang S., Sun B.* The Antarctic Subglacial Hydrological Environment and International Drilling Projects: A Review. *Water*. 2024, 16: 1111. <https://doi.org/10.3390/w16081111>