

УДК 550.83

ОБОСНОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ГЛУБИННОГО СТРОЕНИЯ РАЙОНА ОЗЕРА ВОСТОК*



Г. Д. ГОРЕЛИК,
доцент, канд. техн. наук,
gorelik_gd@pers.spmi.ru



А. С. ЕГОРОВ,
зав. кафедрой, проф.,
д-р геол.-минерал. наук



И. А. ШУКЛИН,
аспирант



Д. Е. УШАКОВ,
инженер

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

Введение

Антарктида была открыта Первой русской антарктической экспедицией, которая в 1820 г. на шлюпах «Восток» и «Мирный» под командованием Ф. Ф. Беллинсгаузена и М. П. Лазарева подошла к берегам шестого континента. Начальный этап исследований имел географическую направленность: на карту были нанесены контуры береговой линии, крупные ледники и горные массивы. Дальнейшее изучение Антарктиды было затруднено наличием мощного ледникового покрова. Это определило ведущую роль геофизических исследований и бурения для получения информации о подледниковой геологии [1, 2]. Следующий этап активного изучения Антарктиды связан с проведением Международного геофизического года (1957–1958 гг.) [3]. Первыми исследованиями стали сейсмические и гравиметрические съемки на Западном шельфовом леднике в районе станции Мирный. В 1963 г. на шельфовом леднике Бранта впервые в истории Антарктиды проведено радиолокационное зондирование. В 1964 г. выполнены магнитотеллурические исследования на станции Восток [3]. В 1993 г. по результатам анализа данных спутниковой альтиметрии вблизи этой станции открыто крупнейшее подледниковое озеро [4],

Рассмотрены актуальные направления исследований озера Восток – крупнейшего подледникового водоема в Антарктиде. Проанализированы и систематизированы результаты ранее проведенных геофизических исследований. Описаны существующие гипотезы глубинного строения и генезиса грабена оз. Восток. В качестве перспективных направлений исследований намечены: изучение особенностей структуры земной коры; определение мощности и характера залегания осадочных отложений на дне озера.

Ключевые слова: геофизические исследования, Антарктида, озеро Восток, магнитотеллурическое зондирование, сейсморастведка, радиолокация, подледниковые водоемы, осадочные отложения

DOI: 10.17580/gzh.2024.09.09

комплексные исследования геологического строения, генезиса и донных осадков которого являются актуальной задачей [5].

Исследования озера Восток

В 1995 г. было начато планомерное изучение района подледникового озера Восток геофизическими методами. Учеными Полярной морской геологоразведочной экспедиции в период с 1995 по 2008 г. выполнены 318 сейсмических зондирований методом отраженных волн (МОВ) с использованием взрывных поверхностных источников (детонирующий шнур). На сейсмических разрезах четко прослеживается отражение от контакта «лед–вода». Отражение «вода–донные осадки» отмечается менее контрастно, и оценить мощность и структуру осадочной толщи озера в общем случае не представляется возможным. Результатом этих работ стала оценка глубин озера Восток по всей акватории [6].

В 1998 г. начаты радиолокационные исследования с использованием ледового локатора РЛС-60–98; с 2006 по 2008 г. применяли его более совершенную модификацию РЛС-60–06. Всего выполнено 5190 км наземного радиолокационного профилирования. На радарограммах четко выделяется отражение, соответствующее границе «лед–вода», что позволяет установить мощность ледового покрова в районе озера, которая варьирует в пределах от 3600 до 4350 м [6]. В водной среде происходит интенсивное затухание электромагнитной волны, что делает невозможным изучение морфологии дна озера и строения донных отложений.

В сезоне 2000/01 г. в районе оз. Восток американскими исследователями проведены сейсмологические и

*Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (FSRW-2024-0003. Фундаментальные междисциплинарные исследования геологических образований Антарктиды в районе станции Восток).

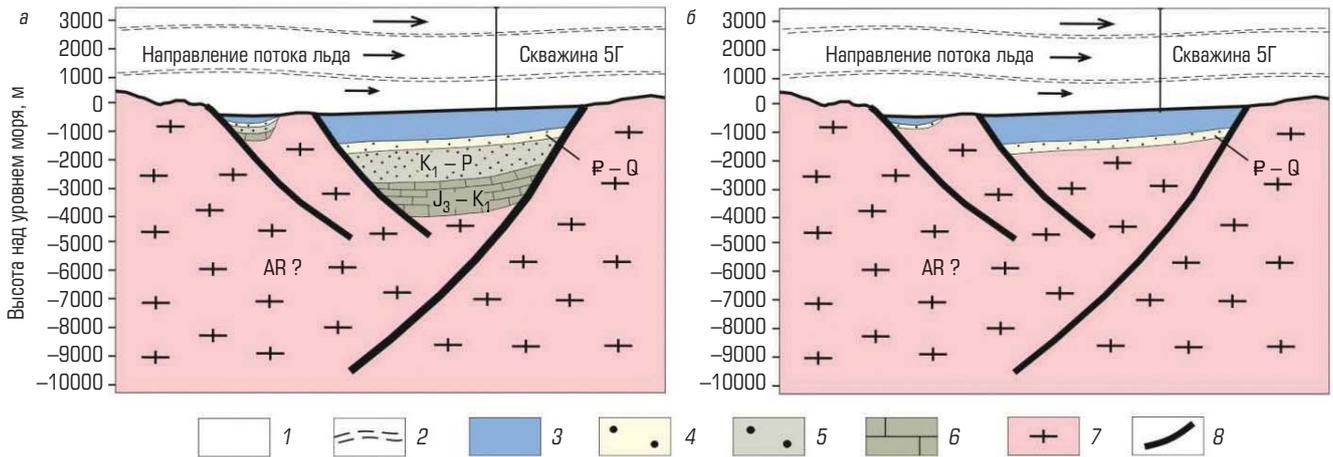


Рис. 1. Альтернативные модели рифтогенной земной коры района озера Восток доледникового заложения (а) и постледникового заложения (б):

1 – ледник; 2 – неоднородности ледника; 3 – водный слой; 4 – осадки P-Q (ледниково-озерные); 5 – осадки K₁-P (флювиальные и озерные); 6 – осадки J₃-K₁ (карбонатные породы); 7 – кристаллический фундамент; 8 – разрывное нарушение

комплексные аэрогеофизические съемки, состоящие из гравиметрических, магнитных, радиолокационных и лазерных альтиметрических измерений. Альтитуда полета составляла 3960 м с шагом между профилями 7,5 км [7]. Основываясь на результатах решения обратной задачи гравиразведки, американские ученые связывают образование озерной впадины с протерозойским надвигом континентальной коры на пассивную окраину кратона и предполагают аккумуляцию на дне озера мощной осадочной толщи (более 5 км) [8].

Г. Л. Лейченков предполагал, что данная структура является длительно развивающимся рифтовым грабеном. Его заложение может быть связано с позднеюрско-раннемеловым растяжением, которое имело место в ходе распада Гондваны. Грабен оз. Восток рассматривают в качестве составного элемента крупнейшей рифтовой системы Ламберта [9]. В рамках этой модели предполагается, что мощность осадочных отложений на дне озера составляет несколько километров, и они могут быть представлены карбонатами, породами флювиального, озерного, а также ледниково-озерного происхождения (рис. 1, а) [9].

В сезоне 2002/03 г. в южной части оз. Восток выполнены сейсмологические исследования методом обменных волн землетрясений на трех пунктах наблюдения. В результате работ изучена структура радиальной расслоенности кристаллической коры и установлена ее мощность, составляющая 34–36 км [10].

Сотрудниками Полярной морской геологоразведочной экспедиции в период с 2009 по 2013 г. в районе оз. Восток проведены сейсмические исследования методом преломленных волн. Результаты работ показывают, что поверхность слоя со скоростями 6–6,2 км/с соответствует отражению от дна озера; т. е. толщина осадков является незначительной (до

200 м) и подстилается породами кристаллического фундамента (см. рис. 1, б), что не согласуется с результатами гравиметрических исследований американских ученых. Этот факт заставляет ограничивать возраст начала накопления осадков озера близким к оледенению Антарктиды (около 34 млн лет) [11].

Разрешить это противоречие возможно лишь путем проведения комплекса геофизических исследований вдоль опорных профилей, заложенных в крест простирания предполагаемой рифтовой структуры. Установление мощности, морфологии и состава осадков позволит оценить возраст [12, 13] и возможную связь грабена оз. Восток с другими рифтовыми системами Антарктиды. Малоизученным остается консолидированный фундамент района подледникового оз. Восток, получение сведений об особенностях строения которого даст возможность определить генетический тип и геодинамический режим формирования этой структуры.

Качество данных гравиметрической и магнитной съемки, проведенной в сезоне 2000/01 г., позволяет провести расчет основных трансформаций потенциальных полей и решить обратные задачи вдоль опорных сечений. Это даст возможность получить дополнительную информацию о глубинном геологическом строении района оз. Восток.

Для решения поставленных геологических задач по изучению подледникового оз. Восток предлагается выполнить комплекс магнитотеллурических, сейсмических и радиолокационных съемок.

Методы исследований

Магнитотеллурическое зондирование (МТЗ). В 2010–2012 гг. международной группой ученых были выполнены масштабные магнитотеллурические исследования района

центральных Трансантарктических гор вдоль профиля протяженностью 550 км. Время экспозиции на каждой точке составляло от 4 до 11 дней, что обеспечивало глубину исследований до 500 км. Использовали пятиэлектродную крестообразную расстановку с длиной дипольных линий 150 м, в качестве электродов применяли титановые пластины размером 45×60 см с подключенными предусилителями. Целью этих работ являлось изучение механизма формирования данной структуры. Результирующий разрез удельного электрического сопротивления (УЭС) центральной части Трансантарктических гор показал резкие различия в строении, мощности и составе литосферы Западной и Восточной Антарктиды [14].

В 2019–2020 гг. в районе залива Прюдз (станция Чжуншань) китайскими учеными проведены магнитотеллурические исследования вдоль профиля протяженностью 27 км с шагом зондирования от 2 до 4 км. Время экспозиции составляло от 1 до 6 дней, что позволяло изучить строение земной коры до глубины 25–30 км. На полученном геоэлектрическом разрезе выделена зона пониженных значений УЭС, положение которой согласуется с крупной магнитной аномалией, называемой «линеamentом Эймери». Интерпретация этой структуры пока не закончена [15, 16].

В 2004–2006 гг. в районе Оазиса Ширмахера (станция Майтри) на профиле длиной 16 км индийскими исследователями были выполнены магнитотеллурические наблюдения на 9 точках. Время экспозиции на каждой точке составляло 3–4 дня (глубина исследований 30–40 км). Изучение этого региона показало наличие высокоомной (8000–10000 Ом·м) верхней коры, мощность которой изменяется в пределах от 20 км на востоке до 10 км на западе. Исследователи пришли к заключению, что верхняя кора выполнена гнейсами, также обладающими высокими значениями УЭС. Это подтверждает представление о том, что данный район является частью древнего кратона [17].

Анализ результатов выполненных работ в Антарктиде позволяет утверждать, что проведение магнитотеллурических исследований способно расширить познания о строении земной коры района оз. Восток.

Опыт проведения магнитотеллурических исследований в Антарктиде показывает, что серьезной проблемой при проведении работ является высокое сопротивление заземления электродов в ледниковый покров, достигающее значений в десятки мегаом, что приводит к емкостным утечкам и искажению кривых МТЗ. Аппаратурно-методическое решение этой проблемы – использование предусилителей с высоким входным сопротивлением [18]. Еще одной проблемой могут стать сильные ветра, вызывающие электризацию частиц льда и снега во время сальтации. Эта проблема решается на стадии обработки результатов наблюдений путем удаления записей, полученных при скорости ветра более 7 м/с, поскольку при меньшей скорости ветра указанные помехи незначительны, и ими можно пренебречь [19].

Планируемые магнитотеллурические съемки предлагается проводить с использованием измерительного комплекса NORD, разработанного ООО «Северо-Запад» [20]. Магнитотеллурическая станция имеет относительно низкую входную емкость, что позволит избежать дополнительных искажений, связанных с высоким сопротивлением заземления. Большим достоинством аппаратуры является наличие дистанционного управления и передачи данных, что позволяет проверять их качество в режиме реального времени. Для работы в суровых климатических условиях (–40 °С и ниже) с высоким сопротивлением заземления в качестве электродов предлагается использование металлических пластин размером 45×60 см с подключенными предусилителями. Еще одним методическим решением, повышающим качество записи, является использование «гибридных» линий: увеличение длины и емкости проводов, ослабляющих искажения, вызванные высоким сопротивлением заземления [20].

Исходя из опыта ранее проведенных работ, шаг точек МТЗ по профилю планируется задать равным 2 км. Для достижения целевых глубин земной коры (30–40 км) требуется экспозиция не менее 3–4 дней; длина крестообразной дипольной линии должна составлять 100–150 м. Для устранения ветровых помех электрические диполи и магнитные датчики необходимо погружать в снег на глубину до 1 м. Также требуется измерение скорости ветра для исключения аномальных значений записи кривых МТЗ на стадии постобработки [21]. Длительность экспозиции в этих условиях обеспечивается подключением дополнительных источников питания.

Сейсмозведка. В 2007–2008 гг. учеными из Великобритании проведены сейсмические исследования МОВ-ОСТ (метод отраженных волн в модификации общей средней точки) оз. Эллсворт, которое расположено под ледниковым щитом Западной Антарктиды мощностью около 3000 м. Работы проводили с использованием взрывного устройства массой 0,45 кг, закладываемого в скважину на глубину 30 м. Регистрацию сейсмического сигнала осуществляли с помощью 48-канальной сейсмостанции, пункты приема расположены с интервалом 10 м и удалены от пункта возбуждения на расстояние от 30 до 500 м. По результатам сейсмических исследований определена мощность осадков на дне озера, которая составляет 6 м, что, в свою очередь, позволило оценить возраст образования озера, основываясь на скорости седиментации в других антарктических озерах [22, 23].

В 2010–2011 гг. в районе Антарктического ледника Хальфарригген проведены экспериментальные исследования с взрывными и вибрационными источниками с целью отработки методики проведения сейсмозведочных работ. Анализ качества полученных данных показывает, что отражения от поверхности коренных пород более отчетливо прослеживаются при использовании взрывных источников, что связывают с более широким частотным диапазоном [24]. Однако использование вибрационного источника многократно увеличивает

производительность сейсморазведочных работ. Работы выполняли с использованием виброисточника Failing Y-1100 с максимальным усилием 120 кН и 60-канальной косой длиной 1,5 км с шагом пунктов приема 25 м. Мощность ледникового покрова в районе работ составляет 900 м; приповерхностной толщи фирна – 80 м [25]. Глубина проникновения, оцениваемая по кратным отражениям от границы «лед–коренные породы» при средней скорости 3800 м/с в леднике, соответствует длине пути около 10,5 км [24].

В районе немецкой станции Конен для возбуждения упругих колебаний при выполнении сейсморазведочных работ использовали вибрационный источник EnviroVibe с максимальным усилием 66 кН. Регистрацию записей проводили 60-канальной косой длиной 1,5 км. Мощность ледника в этом районе составляет 2785 м. Было определено, что максимальная глубина проникновения упругих волн составляет 4 км, т. е. примерно на 1000 м ниже подледниковой поверхности [26].

Таким образом, сейсмические исследования МОВ-ОСТ способствуют изучению мощности и структуры осадочных отложений подледникового оз. Восток, а также локализации места заложения новой глубокой скважины, обеспечивающей доступ для отбора донных проб [27].

Исходя из опыта ранее проведенных исследований, сейсморазведочные работы МОВ-ОСТ планируется выполнять с использованием фланговой расстановки с длиной приемной линии 4–5 км методом многократных перекрытий. Одной из сложностей при сейсмических работах в Антарктиде является затухание упругих волн в снежно-фирновом слое. В сезонах 68-й и 69-й Российской антарктической экспедиции (РАЭ) были выполнены комплексные геолого-геофизические исследования этого слоя. В качестве источника упругих волн для глубинных исследований предлагается использовать взрывы в скважинах глубиной 30–70 м; оптимальная глубина заложения заряда будет определена в результате проведения опытно-методических работ. Для регистрации сейсмических волн планируется использовать бескабельные автономные трехкомпонентные регистраторы ТЕЛСС [28], так как эксплуатация сейсмических кос будет затруднительна в антарктических условиях. Как показали опытные исследования, проведенные в периоды 68-й и 69-й РАЭ, регистраторы такого типа могут сохранять работоспособность в течение более чем 14 дней без подзарядки в условиях Центральной Антарктиды [29].

Радиолокация. Опыт проведения наземных радиолокационных исследований в районе оз. Восток, выполненных по нерегулярной сети профилей, а также по трассам следования санно-гусеничных походов «Мирный – Восток» и «Прогресс – Восток», свидетельствует, что этот метод позволяет установить границу «лед–вода» и «лед–коренная порода», т. е. определять контуры береговой линии подледниковых озер и структуру залегания коренных пород [1].

Актуальной задачей на данном этапе исследований является разработка опытной модели радиолокатора,

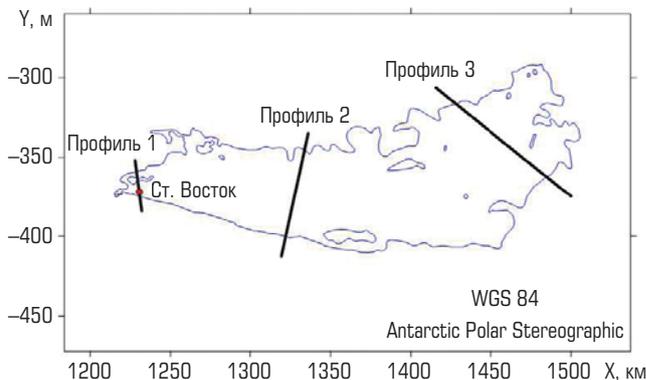


Рис. 2. Расположение профилей геофизической съемки (составлено авторами)

обеспечивающей планомерное изучение подледникового рельефа в районе оз. Восток. Технические характеристики радиолокатора должны быть сопоставимы с последними модификациями РЛС-60–06: частота зондирующих импульсов 60 МГц, частота исследования импульсов 1 кГц, длина импульсов 1 мкс, мощность в импульсе 80 кВт, динамический диапазон 180 дБ, полоса пропускания 3 МГц [1].

Результаты исследований

Дальнейшее изучение подледникового оз. Восток предлагается разбить на два этапа: на первом выполнить отработку методики проведения комплексных геофизических исследований вблизи станции Восток по линии профиля 1 (рис. 2); на втором этапе провести геофизические исследования в крест южного и северного суббассейнов озера, имеющих различную морфологию, вдоль профилей 2 и 3. Поскольку вдоль профиля 1 ранее были проведены сейсморазведочные и радиолокационные работы, возможно выполнить контроль результатов современного этапа исследований посредством их сопоставления с ретроспективными данными [30, 31].

Выводы

Проведены систематизация и обобщение результатов ранее проведенных геофизических исследований в районе оз. Восток, выделены актуальные направления дальнейшего изучения глубинного строения и генезиса этой структуры. Изучены специфика и возможные проблемы при работах в сложных гляциологических, географических и климатических условиях, определены возможные технические и методические приемы их решения, проанализирован отечественный и зарубежный опыт проведения геофизических работ в других районах Антарктиды. Предложена методика магнитотеллурических и сейсморазведочных работ в районе оз. Восток. Обоснована необходимость разработки ледового локатора и проведения дополнительной обработки и переинтерпретации материалов ранее выполненных гравитационной и магнитной съемок.

Библиографический список

- Litvinenko V. S., Leitchenkov G. L., Vasiliev N. I. Anticipated sub-bottom geology of Lake Vostok and technological approaches considered for sampling // *Geochemistry*. 2020. Vol. 80. Iss. 3. ID 125556.
- Сербин Д. В., Дмитриев А. Н. Экспериментальные исследования теплового способа бурения плавлением скважины в ледовом массиве с одновременным контролируемым расширением ее диаметра // *Записки Горного института*. 2022. Т. 257. С. 833–842.
- Попов С. В. Шесть десятилетий радиолокационных и сейсмических исследований в Антарктиде // *Лед и снег*. 2021. Т. 61. № 4. С. 587–619.
- Ridley J. K., Cudlip W., Laxon S. W. Identification of subglacial lakes using ERS-1 radar altimeter // *Journal of Glaciology*. 1993. Vol. 39. No. 133. P. 625–634.
- Litvinenko V. Foreword: Sixty-year Russian history of Antarctic sub-glacial lake exploration and Arctic natural resource development // *Geochemistry*. 2020. Vol. 80. Iss. 3. ID 125652.
- Попов С. В., Масолов В. Н., Лукин В. В. Озеро Восток, Восточная Антарктида: мощность ледника, глубина озера, подледный и коренной рельеф // *Лед и снег*. 2011. № 1(113). С. 25–35.
- Studing M., Bell R. E., Karner G. D., Tikku A. A., Holt J. W. et al. Ice cover, landscape setting, and geological framework of Lake Vostok, East Antarctica // *Earth and Planetary Science Letters*. 2003. Vol. 205. Iss. 3–4. P. 195–210.
- Studing M., Karner G. D., Bell R. E., Levin V., Raymond C. A. et al. Geophysical models for the tectonic framework of the Lake Vostok region, East Antarctica // *Earth and Planetary Science Letters*. 2003. Vol. 216. Iss. 4. P. 663–677.
- Лейченко Г. Л., Беляцкий Б. В., Попков А. М., Попов С. В. Геологическая природа подледникового озера Восток в Восточной Антарктиде // *Материалы гляциологических исследований*. 2005. № 98. С. 81–91.
- Исанина Э. В., Крупнова Н. А., Попов С. В., Масолов В. Н., Лукин В. В. О глубинном строении котловины Восток (Восточная Антарктида) по материалам сейсмологических наблюдений // *Геотектоника*. 2009. № 3. С. 45–50.
- Leitchenkov G. L., Antonov A. V., Luneov P. I., Lipenkov V. Y. Geology and environments of subglacial Lake Vostok // *Philosophical Transactions: Mathematical, Physical and Engineering Sciences (Series A)*. 2016. Vol. 374. No. 2059. ID 20140302
- Nefedov Yu., Gribanov D., Gasimov E., Peskov D., Han G. et al. Development of Achimov deposits sedimentation model of one of the West Siberian oil and gas province fields // *Reliability: Theory & Applications*. 2023. Vol. 18. Special Issue 5(75). P. 441–448.
- Prishepa O. M., Kireev S. B., Nefedov Yu. V., Martynov A. V., Lutsky D. S. et al. Theoretical and methodological approaches to identifying deep accumulations of oil and gas in oil and gas basins of the Russian Federation // *Frontiers in Earth Science*. 2023. Vol. 11. ID 1192051
- Wannamaker P., Hill G., Stodt J., Maris V., Ogawa Y. et al. Uplift of the central transantarctic mountains // *Nature Communications*. 2017. Vol. 8. DOI: 10.1038/s41467-017-01577-2
- Xiao E., Jiang F., Guo J., Latif K., Fu L. et al. 3D Interpretation of a Broadband Magnetotelluric Data Set Collected in the South of the Chinese Zhongshan Station at Prydz Bay, East Antarctica // *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14. Iss. 3. ID 496.
- Guo J., Xiao E., Deng J., Li L., Fu L. et al. Electrical Structures of the Lithosphere Along the Prydz Belt: Magnetotelluric Study at Chinese Zhongshan Station, East Antarctica // *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2022. Vol. 47. Iss. 1. P. 695–707.
- Murthy D. N., Veeraswamy K., Harinarayana T., Singh U. K., Santosh M. Electrical structure beneath Schirmacher Oasis, East Antarctica: a magnetotelluric study // *Polar Research*. 2013. Vol. 32. ID 17309.
- Hill G. J., Wannamaker P. E., Maris V., Stodt J. A., Kordy M. et al. Trans-crustal structural control of CO₂-rich extensional magmatic systems revealed at Mount Erebus Antarctica // *Nature Communications*. 2022. Vol. 13. DOI: 10.1038/s41467-022-30627-7
- Hill G. J. On the Use of Electromagnetics for Earth Imaging of the Polar Regions // *Surveys in Geophysics*. 2020. Vol. 41. Iss. 1. P. 5–45.
- Зорин Н. И., Яковлев А. Г. Гибридная приемная линия для измерения электрического поля в широкой полосе частот // *Вестник Московского университета. Серия 4. Геология*. 2021. № 5. С. 54–60.
- Gustafson Ch. D., Key K., Siegfried M. R., Winberry J. P., Fricker H. A. et al. A dynamic saline groundwater system mapped beneath an Antarctic ice stream // *Science*. 2022. Vol. 376. No. 6593. P. 640–644.
- Woodward J., Smith A. M., Ross N., Thoma M., Corr H. F. J. et al. Location for direct access to subglacial Lake Ellsworth: An assessment of geophysical data and modeling // *Geophysical Research Letters*. 2010. Vol. 37. Iss. 11. L11501. DOI: 10.1029/2010GL042884
- Smith A. M., Woodward J., Ross N., Bentley M. J., Hodgson D. A. et al. Evidence for the long-term sedimentary environment in an Antarctic subglacial lake // *Earth and Planetary Science Letters*. 2018. Vol. 504. P. 139–151.
- Hofstede C., Eisen O., Diez A., Jansen D., Kristoffersen Y. et al. Investigating englacial reflections with vibro- and explosive-seismic surveys at Halvfarryggen ice dome, Antarctica // *Annals of Glaciology*. 2013. Vol. 54. Iss. 64. P. 189–200.
- Fernandoy F., Meyer H., Oerter H., Wilhelms F., Graf W. et al. Temporal and spatial variation of stable-isotope ratios and accumulation rates in the hinterland of Neumayer station, East Antarctica // *Journal of Glaciology*. 2010. Vol. 56. No. 198. P. 673–687.
- Eisen O., Hofstede C., Diez A., Kristoffersen Y., Lambrecht A. et al. On-ice vibroseis and snowstreamer systems for geoscientific research // *Polar Science*. 2015. Vol. 9. No. 1. P. 51–65.
- Шишкин Е. В., Большунов А. В., Тимофеев И. П., Авдеев А. М., Ракитин И. В. Модель шагающего пробоотборника для исследования донной поверхности подледникового озера Восток // *Записки Горного института*. 2022. Т. 257. С. 853–864.
- Данильев С. М., Секерина Д. Д., Данильева Н. А. Локализация участков развития геомеханических процессов в подземных выработках по результатам трансформационно-классификационного анализа сейсморазведочных данных // *Записки Горного института*. 2024. Т. 266. С. 260–271.
- Большунов А. В., Васильев Д. А., Дмитриев А. Н., Игнатьев С. А., Кадочников В. Г. и др. Результаты комплексных экспериментальных исследований на станции Восток в Антарктиде // *Записки Горного института*. 2023. Т. 263. С. 724–741.
- Яковлева А. А., Мовчан И. Б., Мединская Д. К., Садыкова З. И. Количественные интерпретации потенциальных полей: от параметрических пересчетов к геоструктурным // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2023. Т. 334. № 11. С. 198–215.
- Таловина И. В., Крикун Н. С., Юрченко Ю. Ю., Агеев А. С. Дистанционные методы исследования в изучении структурно-геологических особенностей строения о. Итуруп (Курильские острова) // *Записки Горного института*. 2022. Т. 254. С. 158–172. 

«GORNYI ZHURNAL», 2024, № 9, pp. 56–61

DOI: 10.17580/gzh.2024.09.09

Substantiation of optimal range of geophysical surveys to study deep structure of the Lake Vostok area

Information about authors

G. D. Gorelik¹, Associate Professor, Candidate of Engineering Sciences, gorelik_gd@pers.spmi.ru

A. S. Egorov¹, Head of Department, Professor, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences

I. A. Shuklin¹, Post-Graduate Student

D. E. Ushakov¹, Engineer

¹Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia

Abstract

This article discusses the current issues and prospects of exploration of the Lake Vostok—the largest subglacial water cave in Antarctica. The study of deep structure of this area

is extremely important for understanding the history of its geological evolution and of the continent generally. When the research object is hidden from direct geological investigations by a thick ice cover, geophysical methods play a key role in its study. The paper analyzes and systematizes the results of previously conducted geophysical research in the specified area and within the boundaries of Antarctica. The existing hypotheses on deep structure and genesis of graben of the Lake Vostok are discussed. The promising directions of the planned studies include: identification of the Earth crust structure features; determination of the thickness and character of occurrence of the Lake Vostok bottom sedimentary strata. The solution of these problems can enable setting location of new well drilling for the purpose of sampling water and bottom sediments. The optimal range of geophysical methods necessary for solving the set tasks includes magnetotelluric, seismic and radar surveys. For each method, the features of implementation and the problems that can arise in Antarctic conditions are presented, as well as the methods and engineering solutions are presented: for seismic measurements, it is necessary to determine the optimum charge depth; for magnetotelluric observations, it is important to develop preamplifiers for measuring equipment and to take into account natural factors which can negatively affect the result of measurements; radar sounding involves the development of an ice locator.

The research was carried out within the state assignment of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (FSRW-2024-0003).

Keywords: geophysical investigations, Antarctica, Lake Vostok, magnetotelluric sounding, seismic survey, radio-echo sounding, subglacial water caves, sediments.

References

- Litvinenko V. S., Leitchenkov G. L., Vasiliev N. I. Anticipated sub-bottom geology of Lake Vostok and technological approaches considered for sampling. *Geochemistry*. 2020. Vol. 80, Iss. 3. ID 125556.
- Serbin D. V., Dmitriev A. N. Experimental research on the thermal method of drilling by melting the well in ice mass with simultaneous controlled expansion of its diameter. *Journal of Mining Institute*. 2022. Vol. 257. pp. 833–842.
- Popov S. V. Six decades of radar and seismic research in Antarctica. *Water Resources*. 2021. Vol. 61, No. 4. pp. 587–619.
- Ridley J. K., Cudlip W., Laxon S. W. Identification of subglacial lakes using ERS-1 radar altimeter. *Journal of Glaciology*. 1993. Vol. 39, No. 133. pp. 625–634.
- Litvinenko V. Foreword: Sixty-year Russian history of Antarctic sub-glacial lake exploration and Arctic natural resource development. *Geochemistry*. 2020. Vol. 80, Iss. 3. ID 125652.
- Popov S. V., Masolov V. N., Lukin V. V. Lake Vostok, East Antarctica: Glacier thickness, lake depth, subglacial and parent topography. *Led i Sneg*. 2011. No. 1(113). pp. 25–35.
- Studinger M., Bell R. E., Karner G. D., Tikku A. A., Holt J. W. et al. Ice cover, landscape setting, and geological framework of Lake Vostok, East Antarctica. *Earth and Planetary Science Letters*. 2003. Vol. 205, Iss. 3-4. pp. 195–210.
- Studinger M., Karner G. D., Bell R. E., Levin V., Raymond C. A. et al. Geophysical models for the tectonic framework of the Lake Vostok region, East Antarctica. *Earth and Planetary Science Letters*. 2003. Vol. 216, Iss. 4. pp. 663–677.
- Leychenkov G. L., Belyatskiy B. V., Popkov A. M., Popov S. V. Geological nature of the subglacial Lake Vostok in East Antarctica. *Materialy glyatsiologicheskikh issledovaniy*. 2005. No. 98. pp. 81–91.
- Isanina E. V., Krupnova N. A., Popov S. V., Masolov V. N., Lukin V. V. Deep structure of the Vostok Basin, East Antarctica as deduced from seismological observations. *Geotectonics*. 2009. Vol. 43, No. 3. pp. 221–225.
- Leitchenkov G. L., Antonov A. V., Luneov P. I., Lipenkov V. Y. Geology and environments of subglacial Lake Vostok. *Philosophical Transactions: Mathematical, Physical and Engineering Sciences (Series A)*. 2016. Vol. 374, No. 2059. ID 20140302
- Nefedov Yu., Gribov D., Gasimov E., Peskov D., Han G. et al. Development of Achimov deposits sedimentation model of one of the West Siberian oil and gas province fields. *Reliability: Theory & Applications*. 2023. Vol. 18, Special Issue 5(75). pp. 441–448.
- Prischeva O. M., Kireev S. B., Nefedov Yu. V., Martynov A. V., Lutsky D. S. et al. Theoretical and methodological approaches to identifying deep accumulations of oil and gas in oil and gas basins of the Russian Federation. *Frontiers in Earth Science*. 2023. Vol. 11. ID 1192051
- Wannamaker P., Hill G., Stodt J., Maris V., Ogawa Y. et al. Uplift of the central transantarctic mountains. *Nature Communications*. 2017. Vol. 8. DOI: 10.1038/s41467-017-01577-2
- Xiao E., Jiang F., Guo J., Latif K., Fu L. et al. 3D Interpretation of a broadband magnetotelluric data set collected in the south of the Chinese Zhongshan Station at Prydz Bay, East Antarctica. *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14, Iss. 3. ID 496.
- Guo J., Xiao E., Deng J., Li L., Fu L. et al. Electrical structures of the lithosphere along the Prydz Belt: Magnetotelluric study at Chinese Zhongshan Station, East Antarctica. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2022. Vol. 47, Iss. 1. pp. 695–707.
- Murthy D. N., Veeraswamy K., Harinarayana T., Singh U. K., Santosh M. Electrical structure beneath Schirmacher Oasis, East Antarctica: A magnetotelluric study. *Polar Research*. 2013. Vol. 32. ID 17309.
- Hill G. J., Wannamaker P. E., Maris V., Stodt J. A., Kordy M. et al. Trans-crustal structural control of CO₂-rich extensional magmatic systems revealed at Mount Erebus Antarctica. *Nature Communications*. 2022. Vol. 13. DOI: 10.1038/s41467-022-30627-7
- Hill G. J. On the use of electromagnetics for earth imaging of the Polar regions. *Surveys in Geophysics*. 2020. Vol. 41, Iss. 1. pp. 5–45.
- Zorin N. I., Yakovlev A. G. HA hybrid receiving line for measuring the electric field in a wide frequency band. *Moscow University Geology Bulletin*. 2021. Vol. 76, No. 6. pp. 639–645.
- Gustafson Ch. D., Key K., Siegfried M. R., Winberry J. P., Fricker H. A. et al. A dynamic saline groundwater system mapped beneath an Antarctic ice stream. *Science*. 2022. Vol. 376, No. 6593. pp. 640–644.
- Woodward J., Smith A. M., Ross N., Thoma M., Corr H. F. J. et al. Location for direct access to subglacial Lake Ellsworth: An assessment of geophysical data and modeling. *Geophysical Research Letters*. 2010. Vol. 37, Iss. 11. L11501. DOI: 10.1029/2010GL042884
- Smith A. M., Woodward J., Ross N., Bentley M. J., Hodgson D. A. et al. Evidence for the long-term sedimentary environment in an Antarctic subglacial lake. *Earth and Planetary Science Letters*. 2018. Vol. 504. pp. 139–151.
- Hofstede C., Eisen O., Diez A., Jansen D., Kristoffersen Y. et al. Investigating englacial reflections with vibro- and explosive-seismic surveys at Halvfarryggen ice dome, Antarctica. *Annals of Glaciology*. 2013. Vol. 54, Iss. 64. pp. 189–200.
- Fernandoy F., Meyer H., Oerter H., Wilhelms F., Graf W. et al. Temporal and spatial variation of stable-isotope ratios and accumulation rates in the hinterland of Neumayer station, East Antarctica. *Journal of Glaciology*. 2010. Vol. 56, No. 198. pp. 673–687.
- Eisen O., Hofstede C., Diez A., Kristoffersen Y., Lambrecht A. et al. On-ice vibroseis and snowstreamer systems for geoscientific research. *Polar Science*. 2015. Vol. 9, No. 1. pp. 51–65.
- Shishkin E. V., Bolshunov A. V., Timofeev I. P., Avdeev A. M., Rakitin I. V. Model of a walking sampler for research of the bottom surface in the subglacial lake Vostok. *Journal of Mining Institute*. 2022. Vol. 257. pp. 853–864.
- Danilev S. M., Seckerina D. D., Danileva N. A. Localization of sites for the development of geomechanical processes in underground workings based on the results of the transformation and classification analysis of seismic data. *Journal of Mining Institute*. 2024. Vol. 266. pp. 260–271.
- Bolshunov A. V., Vasilev D. A., Dmitriev A. N., Ignatev S. A., Kadochnikov V. G. et al. Results of complex experimental studies at Vostok station in Antarctica. *Journal of Mining Institute*. 2023. Vol. 263. pp. 724–741.
- Yakovleva A. A., Movchan I. B., Medinskaia D. K., Sadykova Z. I. Quantitative interpretations of potential fields: From parametric to geostructural recalculations. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering*. 2023. Vol. 334, No. 11. pp. 198–215.
- Talovina I. V., Krikun N. S., Yurchenko Yu. Yu., Ageev A. S. Remote sensing techniques in the study of structural and geotectonic features of Iturup Island (the Kuril Islands). *Journal of Mining Institute*. 2022. Vol. 254. pp. 158–172.