

## Предполагаемая геология дна озера Восток и рассматриваемые технологические подходы к отбору проб

В.С. ЛИТВИНЕНКО<sup>1</sup>, Г.Л. ЛЕЙЧЕНКОВ<sup>2,3</sup>, Н.И. ВАСИЛЬЕВ<sup>1</sup> ✉

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Всероссийский научно-исследовательский институт геологии и минеральных ресурсов Мирового океана им. академика И.С. Грамберга (ФГБУ «ВНИИОкеангеология»), Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

✉ vasilev\_ni@mail.ru

**Ссылка для цитирования оригинальной статьи:** Litvinenko, V.S.; Leitchenkov, G.L.; Vasiliev, N.I. Anticipated sub-bottom geology of Lake Vostok and technological approaches considered for sampling. *Geochemistry* 2020, 80 (3), 125556. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2019.125556>

**Аннотация:** Осадочные толщи содержат уникальную запись экологических и климатических изменений в Центральной Антарктиде за последние 20–30 млн лет, поэтому их отбор и изучение крайне важны. Толщина озера под станцией Восток (толщина водного слоя) оценивается в 600 м, а толщина осадочных пород – менее нескольких сотен метров. Строгие требования к экологической безопасности не позволяют использовать обычные технологии бурения во избежание загрязнения воды озера буровым раствором, поэтому разработка специальных технологий является настоящей необходимостью. В данной работе представлен прогнозный геологический разрез южной части озера Восток и потенциальных придонных слоев, а также техническое решение для отбора проб со дна озера в скважине 5G на станции Восток.

**Ключевые слова:** Антарктида, подледниковое озеро, осадки, подледные технологии отбора проб.

## Anticipated sub-bottom geology of Lake Vostok and technological approaches considered for sampling

Vladimir S. LITVINENKO<sup>1</sup>, German L. LEITCHENKOV<sup>2,3</sup>, Nikolay I. VASILIEV<sup>1</sup> ✉

<sup>1</sup> Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia

<sup>2</sup> All-Russia Research Institute for Geology and Mineral Resources of the World Ocean (VNIIOkeangeologia), Saint-Petersburg, Russia

<sup>3</sup> Saint Petersburg State University, Saint-Petersburg Petersburg, Russia

✉ vasilev\_ni@mail.ru

**Abstract:** Sedimentary strata contain a unique record of environmental and climatic changes in Central Antarctica over the past 20–30 Ma and their sampling and study is of utmost importance. The lake beneath Vostok Station (thickness of water layer) is estimated as 600 m and sediment thickness as less than a few hundred meters. Strict environmental safety requirements preclude the use of conventional drilling technology to avoid drilling fluid contaminating the lake water, and thus the development of special technology is imperative. This paper provides a predictive geological cross-section of southern Lake Vostok and the potential sub-bottom strata including a technical solution for lake bottom sampling in 5 G borehole at Vostok Station.

**Keywords:** Antarctica; Subglacial lake; Sediments; Sub-ice sampling technologies.

### 1. Введение

Подледниковое озеро Восток расположено в 1000 км от побережья и находится под ледяным щитом толщиной 3700–4000 м (Капица и др., 1996) в пределах тектонически стабильной Восточно-Антарктической платформы. Озеро занимает обширную донную впадину длиной и шириной ~300 км и 40–80 км соответственно. По сейсмическим данным, средняя глубина озера составляет около 1000 м ниже уровня моря и 1200–1500 м ниже берега озера (Попов и др., 2012; рис. 1).

В начале 1970-х годов российские ученые инициировали проект глубокого подледного бурения в самой южной части озера Восток в месте, которое впоследствии было названо «Станция Восток». При этом до 1993 года преимущественно использовались установки термического бурения, и были получены значительные результаты по разработке и эксплуатации этих устройств (Кудряшов и др., 1991; Литвиненко и др., 2014). Отбор ледяных кернов позволил получить ценную информацию об изменениях климата и составе атмосферы Земли за последние 420 000 лет (Петит

\* Перевод подготовлен для повышения интереса русскоязычной аудитории к данной статье.

© 2020 The Authors. Published by Elsevier GmbH. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

© Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II (перевод), 2025.

и др., 1999; Де Конто и Поллард, 2003). В 2012 году пятая скважина (названная 5G) достигла поверхности озера (воды) на глубине льда 3769,3 м (Васильев и др., 2012); это инженерное достижение было высоко оценено международным научным сообществом.

Следующая важная и амбициозная научная задача – взять пробы со дна озера с помощью 5G или новой скважины. Однако строгие требования к экологической безопасности при проведении исследований озера и отборе проб донных отложений не позволяют использовать традиционные методы бурения, так как заливка жидкости из скважины приведет к загрязнению озера. Поэтому необходимо разработать оборудование для отбора проб, работающее в соответствии с основной концепцией исследования подледникового озера Восток – охраной уникальной среды подледникового озера Восток (Лукин и Васильев, 2014). В данной работе представлена информация о прогнозируемом геологическом (осадочном) разрезе, составе донных осадков в южной части озера Восток с использованием седиментационной летописи и рассмотрены возможные технологии отбора проб осадков в этом районе.

## 2. Предполагаемая донная геология озера Восток

Поскольку у нас еще нет технологии, разработанной для отбора проб донных отложений, мы можем только предполагать геологию озера Восток. Поэтому мы используем термин «предполагаемая донная геология озера Восток». Нами были проведены сейсмические измерения в южной части озера (Лейченков и др., 2016). Важную информацию о донных отложениях можно получить из слоя обломочного материала, расположенного в верхней части аккреционного льда (как терригенные, так и аутигенные материалы). Все климатические и палеогеографические условия, представленные ниже, основаны в основном на наблюдениях в открытых регионах, экстраполированных на подледные области, и были приблизительно оценены с помощью кернов дистального океанического бурения и численного моделирования. После отбора проб мы сможем существенно уточнить как гипотезы о геологии внутренних районов Антарктики, так и палеогеографические условия Земли.

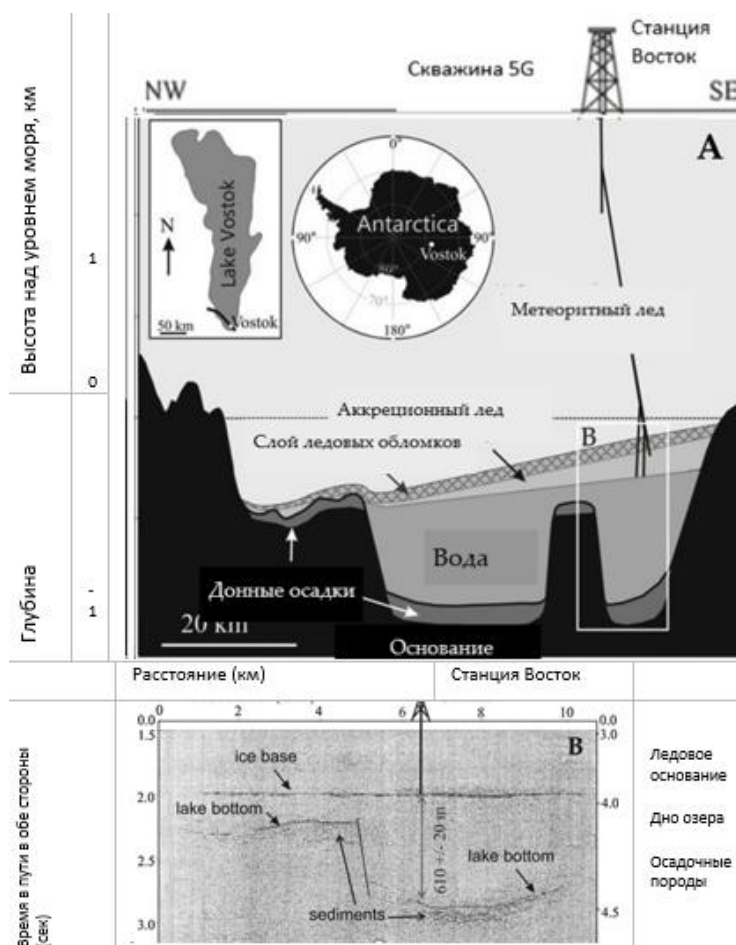


Рис. 1. Структура южного озера Восток. А. Геологический разрез вдоль линии ледохода и через станцию «Восток»; на вставке показана конфигурация озера Восток и положение разреза (сплошная черная линия). В. Сейсмический разрез через станцию «Восток» (белая рамка на геологическом разрезе)

На осадконакопление в озере Восток сильно повлияли климатические и экологические изменения в центральной Антарктиде. В начале мелового периода Антарктида находилась в пределах Южного полярного круга, но климат был мягким и влажным (Фрэнсис и др., 2008). Хотя среднегодовая температура в Антарктиде снизилась ближе к концу мелового периода, теплый климат вернулся в высокие южные широты в течение палеоцена и начала эоцена (Фрэнсис и др., 2008). Последующее длительное планетарное похолодание началось в начале эоцена (51 млн лет назад) и продолжается до сих пор. Однако на границе эоцена и олигоцена (около 34 млн лет назад) резкое похолодание привело к оледенению Антарктики в масштабах континента (Зачос и др., 2001), после чего условия в ледяном основании и среде осадконакопления изменились в ответ на колебания климата. С олигоцена до среднего миоцена (34-14 млн лет назад) Антарктический ледниковый щит был преимущественно влажным, а объем льда составлял от 50 % до 125 % от современного объема. В межледниковые периоды (~32-30, 24-23, 22-18 и 17-15 млн лет назад) ледниковый покров отступал от побережья (Пекар и Кристи-Блик, 2008), а со среднего миоцена (14-13 млн лет назад) Восточно-Антарктический ледниковый покров стал более стабильным и преимущественно сухим, с меньшим эрозионным потенциалом. Временные интервалы 10,5-8,5, 6,4-5,9 и 3,3-3,0 млн лет назад характеризовались относительным потеплением с отступанием ледникового покрова (Пекар и ДеКонто, 2006), но ледниковый покров оставался толстым в Центральной Антарктиде, и его динамика в целом была близка к той, что наблюдается сегодня.

Сейсмические исследования, проведенные в южной части озера Восток, показали, что осадочный чехол под дном озера очень тонкий (до нескольких сотен метров) и подстилается кристаллическим фундаментом (Лейченков и др., 2016; рис. 1). Это свидетельствует о низкой скорости и/или коротком периоде осадконакопления, поэтому можно предположить, что осадочное заполнение озера Восток сформировалось во время антарктического оледенения (когда скорость эрозии и поступление терригенного материала были значительно ослаблены). Кроме того, линия отражательной сейсморазведки, пересекающая самую южную часть озера Восток (рис. 1В), показывает четко стратифицированные отложения, которые, вероятно, связаны с неравномерным осадконакоплением.

Отбор образцов ледяного керна в скважине 5G показал, что нижняя часть ледяного щита под станцией Восток (между 3537 и 3769 м) представлена химически и физически отдельным слоем льда, который образовался в результате аккреции озерной воды (рис. 1) и сформировался при движении ледяного щита через озеро. Замерзание воды в южной части озера Восток свидетельствует об отсутствии осадконакопления в течение как минимум 40-50 тысяч лет (возраст аккреционного льда; Липенков и др., 2012). Нижняя часть метеоритного льда имеет возраст ~1,8 млн лет (Цыганова и Липенков, 2011) и не содержит обломков коренных пород, что говорит об отсутствии эрозии и поступления осадочного материала в озеро в четвертичный период. Модели палеоклимата и изменения ледникового покрова (Нейш и др., 2009) позволили предположить, что подобные условия существовали в Центральной Антарктиде в течение последних 3 млн лет, хотя осаждение тонкозернистых осадков из взвеси в воде озера еще не исключено (Лейченков и др., 2016). Такой режим осаждения зависит от характера циркуляции воды, однако даже при благоприятных условиях, связанных с оседанием обломков, толщина этого слоя вряд ли может превышать несколько сантиметров.

Примерно с 14 млн лет назад ледниковая эрозия в Центральной Антарктиде прервалась и стала в целом незначительной (Джеймисон и др., 2010). Однако ледниковые отложения могли накапливаться в периоды потепления климата в среднем плиоцене (~3,3-3,0 млн лет назад) и в верхнем миоцене (10,5-8,5 и 6,4-5,9 млн лет назад). В эти промежутки времени более теплые условия в основании льда могли способствовать выветриванию коренных пород и поступлению терригенного материала в озеро Восток, хотя и с очень низкой скоростью осаждения. Мы предполагаем, что максимальный объем осадочного чехла в южной части озера Восток формировался в олигоцене – раннем миоцене в связи с динамичным ледниковым покровом, а преобладающее (или исключительное) осаждение происходило в периоды ледниковых минимумов (Цыганова и Липенков, 2011).

Важную информацию о донных отложениях дает слой обломочного материала толщиной 80 м, расположенный в верхней части аккрецированного льда (толщина 260 м) (рис. 1А). Исследования ледяного керна показали, что в этом слое присутствуют миллиметровые агрегаты, состоящие в основном из глин и алеврито-песчаных минеральных зерен (в основном кварца). Некоторые из этих включений содержат обломки пород от округленно-угловатых до полукруглых, которые представлены консолидированными алевролитами и песчаниками размером 0,3-8 мм (Лейченко и др., 2016). Минеральные агрегаты в нарастающем льду соответствуют составу донных осадков, отложенных в мелководном заливе южного озера Восток (рис. 1А), а донные осадки являются продуктами размыва льдом коренных пород выше по течению южного озера Восток, которые, как предполагается, состоят из протерозойских осадочных пород (Лейченко и др., 2016). Морфология минеральных зерен свидетельствует о ледниковой природе донных отложений, и они датированы не моложе оптимума среднего плейстоцена (~3,0 млн лет).

В формировании озерных отложений могла участвовать и незначительная аутигенная минерализация: в ледяных кернах обломочного слоя обнаружены мелкие (5-10 мкм) зерна сульфидов (пириты, молибденит, сфалерит) и карбонатов (арагонит, кальцит). Утверждается, что сульфиды (Булат и Алехина, 2004) свидетельствуют о гидротермальной активности озера Восток, а карбонаты требуют насыщения материнской воды  $\text{CaCO}_3$  (Лейченко и др., 2016). Тем не менее, присутствие карбонатов может позволить провести изотопное датирование донных отложений, в которых отсутствуют окаменелости.

Максимальный возраст осадочного заполнения соответствует времени формирования озерной депрессии (аккомодационного пространства), которое происходило в начале (или во время) крупномасштабного антарктического оледенения. Поэтому, если депрессия имеет тектоническое происхождение, ее развитие должно было сопровождаться усилением теплового потока, особенно на начальном этапе, что оказало бы существенное влияние на базальные температуры и динамику льда и создало бы более благоприятные условия для размыва и осадконакопления донных пород.

### **3. Технология, используемая для транспортировки устройства, свободного от загрязнений, на Дно озера Восток для отбора проб**

Методы, предложенные для проникновения в воды озера Восток (Лукин и Васильев, 2014), основаны преимущественно на использовании физических свойств системы «ледяная шапка – подледниковое озеро Восток». При этом масса льда является плавающей, а давление на границе лед-вода соответствует весу ледяной толщи (давление породы). При бурении давление породы компенсируется гидростатическим давлением заполняющей скважину жидкости. Уменьшая количество заполняющей жидкости, можно обеспечить недостаточную компенсацию горного давления в создавшихся условиях, так как при этом давление воды в озере в данном конкретном месте превышает давление столба заполняющей жидкости. В этих условиях, когда дно скважины соприкасается с поверхностью озера, заполняющая жидкость под действием озерной воды поднимается вверх до высоты в стволе скважины, соответствующей недокомпенсации горного давления. Однако озерная вода, поднимающаяся по скважине, может замерзнуть по всей высоте проникновения, поэтому для предотвращения замерзания воды дно скважины необходимо подогревать во время ее проходки до температуры, обеспечивающей доступность озера для научного оборудования в течение всего периода исследований.

Главным условием проведения исследований подледниковых озер является экологическая безопасность работ. Озерная вода не должна быть загрязнена современными (чужеродными) микроорганизмами или опасными веществами (керосин, фреон), а оборудование, погруженное вглубь озера, не должно контактировать с заполняющей скважину жидкостью при перемещении на поверхность озера.

Предполагается, что на первом этапе исследований подледникового озера определяются состав и свойства воды озера, включая микробиологические исследования на различных глубинах (до 500-700 м) с последующим отбором проб донных отложений. Для соблюдения требований при транспортировке оборудования на поверхность озера оно должно находиться в герметичном корпусе (измерительный модуль), внутреннее давление которого равно атмосферному давлению на поверхности. Затем этот модуль должен быть помещен в секцию транспортировочного корпуса, изолированную от непосредственной окружающей среды, чтобы исключить любую возможность загрязнения. Поверхность транспортировочного корпуса будет контактировать с заполняющей жидкостью. Поэтому, достигнув рабочей зоны, она остановится в 1-2 м от поверхности озера, а измерительный модуль (который закреплен на тонком тросе, намотанном на небольшой лебедке внутри герметичной верхней секции) выйдет из корпуса.

Замерзание столба жидкости внутри скважины и сужение скважины в пределах рабочей зоны можно предотвратить только путем нагрева всего столба воды с минимальным расстоянием в 1 м между заполняющей жидкостью и водой. Этого можно достичь, разместив нагревательные элементы по всей длине устройства, что позволит поддерживать необходимый уровень температуры в рабочей зоне на протяжении всего процесса исследования.

Бурение скважины № 5 Г началось во время 35-й Советской антарктической экспедиции (САЭ, 1990) с использованием термобуров ТЭЛГА и ТБЗС (Литвиненко, 2014), а во время 38-й Российской антарктической экспедиции (РАЭ, 1993) она достигла глубины 2755 м. В ходе 40-й РАЭ (1995 г.) бурение скважины продолжилось с помощью электромеханического бура и без осложнений достигло 3109 м. В ходе 41-й, 42-й и 43-й экспедиций РАЭ (1995-1996, 1996-1997 и 1997-1998 гг.) скважина № 5 Г-1 была пройдена до интервала глубин от 3109 м до 3623 м. После рабочего сезона 1998 года бурение было приостановлено на восемь лет и возобновлено только в январе 2005 года в сезон 51-й РАЭ, когда была достигнута глубина 3650 м. После рабочего сезона 1998 года бурение было приостановлено на восемь лет в связи с необходимостью разработки экологически чистой технологии проникновения в подледниковое озеро Восток, существование которого было подтверждено в середине 90-х годов. До остановки работ оставалось пробурить всего 130 м льда над озером, согласно предварительным расчетам. Бурение было возобновлено в январе 2005 года, во время 51-го сезона РАЭ, когда была достигнута глубина 3650 м. По предварительным расчетам, до прекращения работ оставалось пробурить всего 130 м льда над озером. Несмотря на долгий период бездействия, деформаций стенок скважин не наблюдалось, что связано с практически полной компенсацией давления ледяной вскрыши по отношению к давлению бурения столба жидкости (рис. 2).

5 февраля 2012 г. в сезон 57-й РАЭ было вскрыто подледниковое озеро Восток на глубине 3769.3 м. Вода поднялась в отверстие на глубину около 3200 м (по данным керна), затем уровень воды упал до 3424 м и замерз. В течение следующих двух сезонов (58-й и 59-й РАЭ) после замерзания воды была начата новая офсетная скважина 5G-2, дно которой к февралю 2014 года достигло глубины 3724 м. Начальный наклон новой скважины составил около 0,15 градуса относительно стенки ствола 5G-2. Скважина ниже 3443 м называется скважиной № 5G-3. Ее угол наклона на глубине 3724 м составляет почти 3 градуса, что на 2 градуса меньше, чем у скважины № 5G-2. На глубине 3443 м скважины были отбиты, и получен полный керн ледникового льда. В 60-й сезон бурения РАЭ в январе 2015 года озеро Восток было вновь пройдено на глубине 3769,15 м, вода поднялась до 71 м (что совпадает с расчетным значением с точностью до 1 м). Благодаря изменениям, внесенным в конструкцию буровой установки, бурение скважины 5G до глубины 3650 м происходило без особых проблем на глубине 2500 м, однако затем бурение пришлось прекратить из-за проблемы, известной как «бурение теплого льда». Общий объем бурового раствора (смесь авиационного топлива TS-1 и фреона F-141b) в скважине, его уровень и средняя плотность составляют 65 м<sup>3</sup>, 40 м и примерно 902 кг/м<sup>3</sup>, соответственно.

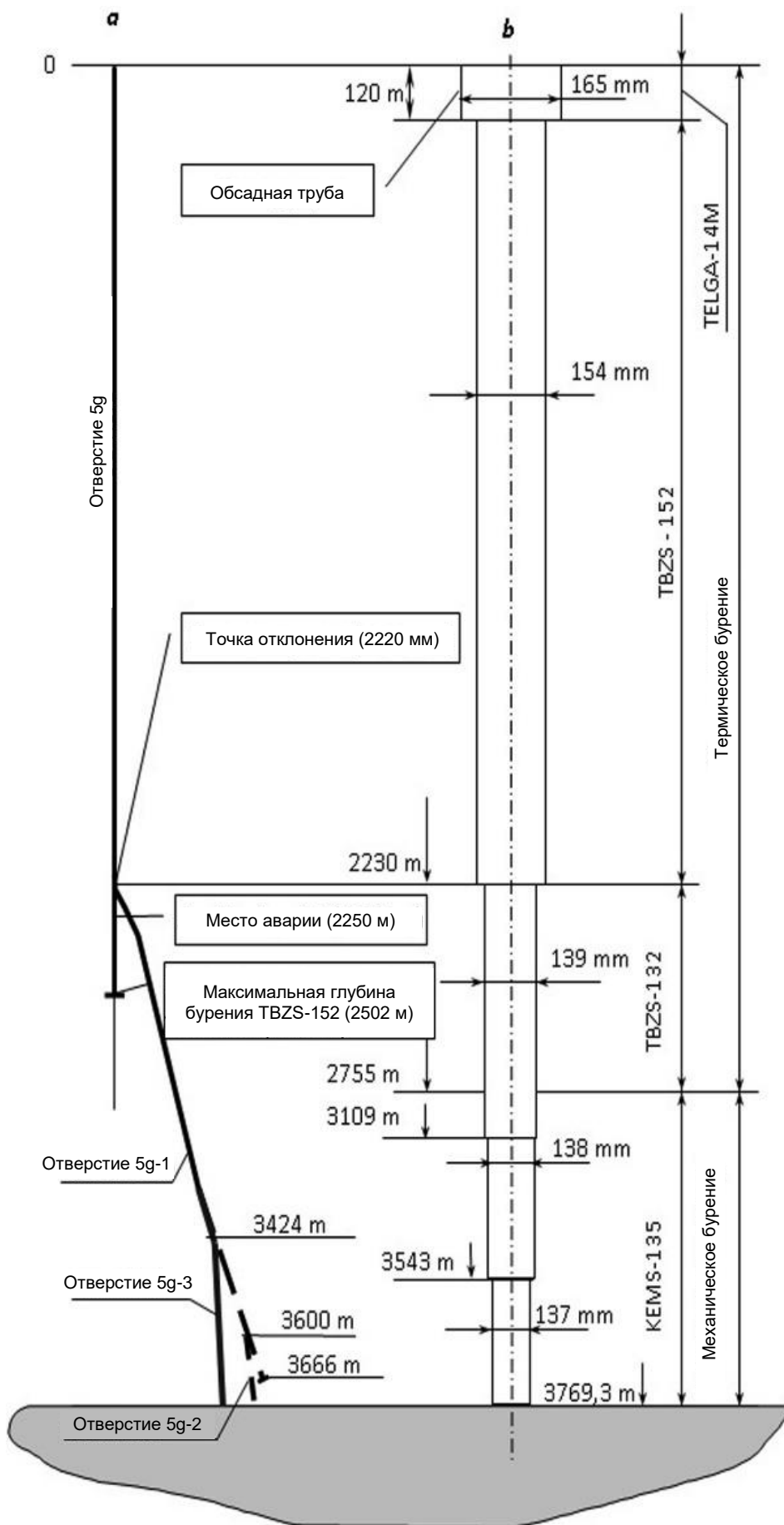


Рис. 2. Схема отверстия № 5G

## 5. Обсуждение

Изначально в плане исследований озера Восток предполагалось, что для изучения озера будет использоваться скважина 5G. Также планировалось, что непосредственно перед проникновением в озеро будет подаваться экологически безопасная буферная жидкость (кремнийорганическая жидкость) для создания буферного слоя, разделяющего воду и буровой раствор на дне скважины. После анализа первой (и особенно второй) проходки было решено, что исследовать озеро Восток с помощью скважины 5G невозможно, так как она была заполнена смесью керосина и фреона, и предотвратить загрязнение воды буровой жидкостью во время работы не удалось.

Поэтому необходимо пробурить новую входную скважину с использованием кремнийорганической жидкости, так как это обеспечит экологическую безопасность при исследовании озера Восток. Кроме того, увеличение диаметра скважины позволит увеличить диаметр устройства, используемого для перемещения оборудования на поверхность озера, а также увеличить объем барабана лебедки, которая транспортирует исследовательское оборудование в озеро. Кроме того, для получения проб донных отложений исследовательский модуль будет заменен на оборудование для отбора проб. Управление оборудованием для исследований или отбора проб может осуществляться двумя способами: автоматически или с помощью устройства, управляемого с поверхности дистанционно. В автоматическом режиме будет осуществляться подъем погруженного модуля с помощью тонкого троса (шнура) диаметром 1 мм, так как между исследовательским модулем и поверхностью грунта нет линии связи. Все дальнейшие операции будут проводиться в автоматическом режиме, а питание будет осуществляться от электрических батарей.

Хотя при использовании несущего троса можно управлять работой оборудования с поверхности, установив связь с погруженным модулем, в котором находится устройство, в этом случае потребуется увеличить длину катушки лебедки. При использовании троса диаметром 3–4 мм длина катушки лебедки должна быть увеличена в 10 раз, а это практически невыполнимое конструктивное требование. Поэтому для этой задачи подходит трос диаметром 2 мм.

Для получения образцов донных отложений были рассмотрены различные технические средства (рис. 3): буровые штанги, динамически уравновешенная бурильная колонна (Васильев и др., 2017), подводная автоматическая буровая установка и комплект обсадных труб между ледниковой скважиной и дном озера для кернового оборудования, бурящего с несущим тросом. Они представлены ниже.

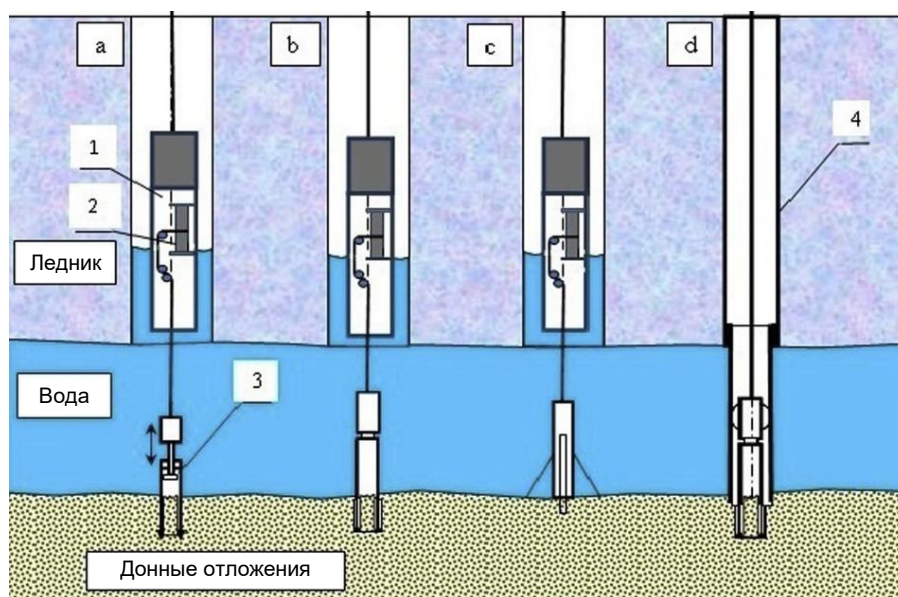


Рис. 3. Варианты оборудования для получения образцов донных отложений из подледникового озера Восток: а. буровые стволы; б. динамически сбалансированная бурильная колонна; в. подводная автоматическая буровая установка; г. посадка обсадной колонны между ледниковой скважиной и дном озера для бурения керноотборным оборудованием с несущим тросом. 1. транспортная установка; 2. тяговый подъемник; 3. бурильная колонна; 4. обсадная колонна

При этом буровые стволы проникают в породу с помощью ударной силы. Самый простой способ добиться этого – использовать кинетическую энергию, накопленную стволом при его опускании (во время свободного падения). Поскольку предполагается, что скорость движения оборудования не превышает 0,25 м/с, глубина проникновения будет небольшой. Хотя размер образца можно увеличить, многократно опуская ствол на дно скважины, попасть в ранее созданное отверстие будет практически невозможно. Однако удлинение образца керна возможно при использовании метода приводного отбора проб, когда буровой ствол проникает в породу до полного ее заполнения (посредством серии ударов, наносимых ударным устройством, расположенным над приводной колонной). Такая колонна позволяет получить образец керна, длина которого равна длине керноотборного ствола, но повторное прохождение этой скважины будет таким же сложным, как и при использовании черпаков.

Основными причинами осложнений при бурении являются изменения физико-механических свойств льда. Таким образом, основной задачей бурового оборудования должно быть предотвращение изменения динамических параметров. Для выбора оптимального бурового оборудования мы провели множество математических расчетов и лабораторных исследований. К 2012 году была подтверждена точность расчетов давления воды в озере. Было получено предварительное представление о составе воды озера и разработана модель ледниковой системы, включающей подледниковое озеро (Петит и др., 1999; Пениц и др., 2004; Липенков и др., 2012). Получена достоверная информация о размерах и глубине подледникового озера (Масолов и др., 2010). Кроме того, стали доступны результаты аналогичных работ, проведенных немецкими коллегами при бурении скважины в рамках программы EPICA-2 (Муршед и др., 2007), когда был обнаружен подледниковый водоем на глубине 2774 м. Подробные математические расчеты, сравнение технологий и демонстрация целесообразности выбора динамически сбалансированной бурильной колонны были описаны нами в предыдущих работах (Августин и др., 2017а, б; Литвиненко и др., 2014; Васильев и др., 2017). Лабораторные исследования динамически уравновешенных бурильных колонн (Васильев и др., 2017) подтвердили устойчивость резонансных колебаний с комбинированной нагрузкой и их инвариантность в широких пределах к изменению динамических параметров. На основании этих данных мы решили вскрыть озеро Восток с помощью динамически сбалансированной электромеханической бурильной колонны.

Использование динамически уравновешенной бурильной колонны позволяет осуществлять роторное бурение без необходимости опоры на стенки ствола скважины для поддержания реактивного момента. По сути, эта бурильная колонна представляет собой двухмассовую электромеханическую колебательно-переменную систему с двумя степенями свободы (Васильев и др., 2017); с ее помощью можно получить образец керна длиной, равной длине стволового керна. Однако, на наш взгляд, получить доступ к этой скважине во второй раз будет так же сложно, как и в случае с буровым стволом, представленным выше. Отличие данного инструмента от всех остальных имеющихся технических средств колонна отличается отсутствием анкерной системы, передающей противодействующий момент при работе долота в забое, что упрощает конструкцию и гарантирует надежную работу колонны инструментов в процессе бурения донных отложений (Августин и др., 2007а; Августин и др., 2007б; Литвиненко и др., 2014; Васильев и др., 2017).

Автоматизированная подводная установка могла бы выполнять эту задачу с увеличением глубины бурения, однако для принятия решения о целесообразности ее создания и использования требуется серьезная конструкторская проработка.

Бурение донных отложений на значительных глубинах может проводиться с высадкой обсадной колонны между ледяной скважиной и дном озера. Посадка обсадных труб изолирует ствол скважины от воды озера. Однако в случае со скважиной 5G, которая заполнена заполняющей жидкостью (смесь керосина и фреона™), установка обсадной трубы невозможна, так как в процессе спуска внутренние и внешние поверхности обсадной трубы будут контактировать с заполняющей жидкостью. Установка посадочной обсадной колонны с обеспечением экологической безопасности возможна, но только при заполнении скважины нейтральной и стерильной заправочной жидкостью.

## 6. Выводы

Отложения озера Восток содержат уникальную запись изменений окружающей среды и климата в Центральной Антарктиде, а также отражают геологию других местонахождений. Гипотезы о геологии внутренних районов Антарктиды основываются в основном на геофизических данных и наблюдениях в открытых районах, экстраполированных на подледные области, а климатические и палеогеографические условия прошлого грубо оцениваются по кернам дистального океанического бурения и численному моделированию. Изучение донных отложений озера Восток дает возможность получить эксклюзивный научный материал, который значительно обогатит наши знания по многим научным дисциплинам. Осадочные толщи содержат уникальную запись экологических и климатических изменений в Центральной Антарктиде за последние 20–30 млн лет. Глубина озера Восток составляет 600 м, а предполагаемая толщина осадочных пород – не более нескольких сотен метров. Бурение через весь осадочный разрез – технологически сложная задача, но взятие проб даже со дна самой верхней части (несколько сантиметров) позволит получить информацию, которая будет иметь большое значение для оценки окружающей среды озера и моделирования процесса осадконакопления. Одной из самых интригующих задач является поиск микробной жизни (как активной, так и ископаемой), поскольку озеро Восток было изолировано более 30 млн лет назад, поэтому здесь могли зародиться неизвестные человечеству формы жизни, которые могут сохраниться в донных отложениях.

Поскольку одной из основных причин осложнений в процессе бурения является изменение физико-механических свойств льда, основными требованиями к буровому оборудованию является предотвращение изменения динамических параметров. Лабораторные исследования динамически сбалансированных бурильных колонн (Васильев и др., 2017) подтвердили устойчивость по отношению к динамическим параметрам. Жесткие требования экологической безопасности не позволяют использовать традиционную технологию бурения во избежание загрязнения озерной воды буровым раствором, поэтому была разработана специальная заправочная жидкость (смесь керосина и фреона™). Использование динамически сбалансированной бурильной колонны позволяет получить представительные образцы донных отложений озера Восток, а бурение новой скважины с использованием кремнийорганической жидкости обеспечит экологическую безопасность подледникового озера в процессе его исследования.

**Благодарности:** Авторы выражают благодарность за материально-техническую поддержку, оказанную Российской антарктической экспедицией. Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований № 18-551600318.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Augustin, L., Motoyama, H., Wilhelms, F., Johnsen, S., Hansen, S., Talalay, P., Vasilie, N., 2007a. Drilling comparison in 'warm ice' and drill design comparison. *Ann. Glaciol.* 47, 73–78. <https://doi.org/10.3189/172756407786857820>
2. Augustin, L., Panichi, S., Frascati, F., 2007b. EPICA Dome C 2 drilling operations: performances, difficulties, results. *Ann. Glaciol.* 47, 68–72. <https://doi.org/10.3189/172756407786857767>
3. Bulat, S.A., Alekhina, I.A., et al., 2004. DNA signature of thermophilic bacteria from the aged accretion ice of Lake Vostok, Antarctica: implications for searching for life in extreme icy environments. *Int. J. Astrobiol.* 3, 1–12. <https://doi.org/10.1017/S1473550404001879>
4. De Conto, R.M., Pollard, D., 2003. Rapid Cenozoic glaciation of Antarctica induced by declining atmospheric CO<sub>2</sub>. *Nature* 421, 245–249.
5. Francis, J.E., Ashworth, A., Cantrill, D.J., Crame, J.A., Howe, J., Stephens, R., Tosolini, A.-M., Thorn, V., 2008. 100 million years of Antarctic climate evolution: evidence from fossil plants. Antarctica: a keystone in a changing world. In: *Proc. of the 10<sup>th</sup> Intern. Symposium on Antarctic Earth Sciences*. Washington D.C. The National Academies Press, 2008. pp. 19–27.
6. Jamieson, S.S.R., Sugden, D.E., Hulton, N.R.J., 2010. The evolution of the subglacial landscape of Antarctica. *Earth Planet. Sci. Lett.* 293, 1–27.
7. Kapitsa, A.P., Ridley, J.K., Robin G. de, Q., Siegert, M.J., Zotikov, I.A., 1996. A large deep freshwater lake beneath the ice of central East Antarctica. *Nature* 381 (6584), 684–686.
8. Kudryashov, B., Chistyakov, V., Litvinenko, V., 1991. Drilling of wells in conditions of change in the aggregate state of rocks [Bureniye skvazhin v usloviyakh izmeneniya agregatnogo sostoyaniya gornyx porod]. *Nedra* In press.
9. Leitchenkov, G., Antonov, A., Luneov, P., Lipenkov, V., 2016. Geology and environments of subglacial Lake Vostok. *Philos. Trans. R. Soc. A* 373, 20140303. <https://doi.org/10.1098/rsta.2014.0303>
10. Lipenkov, V.Y., Polyakova, E.V., Ekaykin, A.A., 2012. Regularities of congelation ice development in subglacial Lake Vostok. *Ice Snow* 4 (120), 65–77 (In Russian).
11. Litvinenko, V., Vasiliev, N., Lipenkov, V., Dmitriev, A., Podoliak, A., 2014. Special aspects of ice drilling and results of 5G hole drilling at Vostok station, Antarctica. *Ann. Glaciol.* 55 (68), 173–178. <https://doi.org/10.3189/2014A0G68A040>

12. Litvinenko, V.S., 2014. Unikalnie tehnika i tehnologia burenia skvajin vo lidah Antarktidi (Unique engineering and technology for drilling boreholes in Aantarctic ice). *Zapiski gornogo instituta* (210), 5–10.
13. Lukin, V., Vasiliev, N., 2014. Technological aspects of the final phase of drilling borehole 5G and unsealing Vostok Subglacial Lake, East Antarctica. *Ann. Glaciol.* 55 (65), 83–89. <https://doi.org/10.3189/2014AoG65A002>. In press.
14. Masolov, V.N., Popov, S.V., Lukin, V.V., Popkov, S.V., 2010. The bottom topography and subglacial Lake Vostok water body, East Antarctica. *Dokl. Earth Sci.* 433, 1092. <https://doi.org/10.1134/S1028334X10080222>
15. Murshed, M.M., Faria, S.H., Kuhs, W.F., Kipfstuhl, S., Wihlms, F., 2007. The role of hydrochlorofl uorocarbon densifiers in the formation of clathratehydrates in deep boreholes and subglacial environments. *Ann. Glaciol.* 47, 109–114. <https://doi.org/10.3189/172756407786857659>.
16. Naish, T., Carter, L., Wolff, E., Pollard, D., Powell, R., 2009. Late Pliocene-Pleistocene Antarctic climate variability at orbital and suborbital scale: ice sheet ocean and atmospheric interactions. In: Florindo, F., Siebert, M. (Eds.), *Antarctic Climate Evolution*. Elsevier, The Netherlands, pp. 465–529.
17. Pekar, S.F., DeConto, R.M., 2006. High-resolution ice-volume estimates for the early Miocene: evidence for a dynamic ice sheet in Antarctica. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 231, 101–109.
18. Pekar, S.F., Christie-Blick, N., 2008. Resolving apparent conflicts between oceanographic and Antarctic climate records and evidence for a decrease in pCO<sub>2</sub> during the Oligocene through early Miocene (34–16 Ma). *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 260, 41–49.
19. Petit, J.R., Jouzel, J., Raynaud, D., Barkov, N.I., Barnola, J.M., Basile, I., Bender, M., Chappellaz, J., Davis, M., Delague, G., Delmotte, M., Kotlyakov, V.M., Legrand, M., Lipenkov, V.Ya., Lorius, C., Pepin, L., Ritz, C., Saltzman, E., Stievenard, M., 1999. Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature* 399 (6735), 429–436.
20. Pienitz, R., Douglas, M.S.V., Smol, J.P. (Eds.), 2004. *Long-Term Environmental Change in Arctic and Antarctic Lakes*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-2126-8>.
21. Popov, S.V., Masolov, V.N., Lukin, V.V., Popkov, A.M., 2012. National seismic, radar and seismological studies of subglacial Lake Vostok. *Ice Snow* 4 (120), 31–38 (In Russian).
22. Tsyganova, E.A., Lipenkov, V.Y., 2011. Growth of air hydrates and age of basal ice in central Antarctica. *Ice Snow* 1 (113), 5–12 (In Russian).
23. Vasiliev, N.I., Lipenkov, V.Y., Dmitriev, A.N., Podolyak, A.V., Zubkov, V.M., 2012. Results and characteristics of 5G hole drilling and the first tapping of Lake Vostok. *Ice Snow* 4 (120), 12–20 (In Russian).
24. Vasilyev, N.I., Leychenkov, G.L., Zagrivny, E.A., 2017. Prospects of obtaining samples of bottom sediments from subglacial lake Vostok. *Proc. Min. Inst.* 224, 199–208. <https://doi.org/10.18454/PMI.2017.2.199>
25. Zachos, J., Pagani, M., Sloan, L., Thomas, E., Billups, K., 2001. Trends, rhythms, and aberrations in global climate 65 Ma to present. *Science* 292, 686–693.