



## ПЕРСПЕКТИВЫ ПОЛУЧЕНИЯ ОБРАЗЦОВ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ПОДЛЕДНИКОВОГО ОЗЕРА ВОСТОК

Н.И.ВАСИЛЬЕВ<sup>1</sup>, Г.Л.ЛЕЙЧЕНКОВ<sup>2</sup>, Э.А.ЗАГРИВНЫЙ<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> Институт наук о Земле, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

В статье обосновывается актуальность отбора и исследования донных отложений подледникового озера Восток. Рассмотрен прогнозный геологический разрез озера Восток, информативность донных отложений. Жесткие требования по обеспечению экологической безопасности работ при исследовании озера и взятия проб донных отложений исключают использование обычной технологии бурения, так как при этом вода озера будет загрязнена заливочной жидкостью из скважины. Для отбора проб донных отложений подледникового озера предлагается использовать динамически уравновешенный буровой снаряд, который позволяет выполнить вращательное бурение без опоры на стены скважины для восприятия реактивного момента. Проведен теоретический анализ работы бурового снаряда, представляющего собой двухмассовую колебательную электромеханическую систему возвратно-вращательного движения (ВВД) с двумя степенями свободы.

**Ключевые слова:** Антарктида, бурение, скважина, подледниковое озеро, пробы донных отложений, керн, лед, геологический разрез

**Как цитировать эту статью:** Васильев Н.И. Перспективы получения образцов донных отложений подледникового озера Восток / Н.И.Васильев, Г.Л.Лейченков, Э.А.Загривный // Записки Горного института. 2017. Т. 224. С. 199-208. DOI: 10.18454/PMI.2017.2.199

**Введение.** Бурение глубоких скважин во льду на станции «Восток» в Антарктиде, которое ведется российскими учеными с 1970 г., выполнялось в первую очередь с целью изучения структурных и физических свойств Антарктического ледникового покрова, а также палеоклимата по результатам изучения ледяного керна. До 1993 г. применялись, в основном, термобуровые снаряды, при разработке и использовании которых наши ученые добились значительных успехов [4, 5, 7]. Второй важной целью буровых работ было получение керна подледниковых пород, что требовало перехода на бурение механическим способом.

Изменение конечной задачи буровых работ в связи с открытием озера Восток [10], в воду которого должна была войти скважина, а также значительные изменения физико-механических свойств льда на глубинах свыше 3000 м потребовали внесения серьезных изменений в технологию работ и планы их проведения [3, 15, 19].

Бурение глубокой ледовой скважины 5Г на станции «Восток» позволило получить ценную информацию о климатических изменениях и составе земной атмосферы за последние 420000 лет [13]. В 2012 г. скважина достигла поверхности самого озера [9]. Это техническое достижение получило высокую оценку в России и за рубежом, однако научные результаты, связанные с изучением озерной воды (которая была отобрана после ее замерзания в скважине) пока не имеют серьезного научного значения. В январе 2015 г. озеро было успешно вскрыто второй раз, и это дает уверенность в надежности разработанной технологии и оценке термобарических условий на контакте ледника с водой озера.

Вряд ли следует ожидать существенных открытий и после изучения озера через имеющуюся скважину с помощью специального подводного аппарата (зонда), так как многие параметры водной толщи уже оценены после исследований конжеляционного льда (льда, намерзшего снизу из воды озера) и воды, замерзшей в скважине после проникновения в озеро. Сейсмические работы, выполненные в районе озера Восток, показывают, что депрессия озера заполнена стратифицированными рыхлыми отложениями, поэтому гораздо более важные данные могут быть получены в случае опробования донных осадков озера Восток, которые содержат бесценный архив природных данных.

В настоящее время США, Великобритания и Китай разработали проекты бурения и отбора горных пород коренного ложа центральной Антарктиды и намерены реализовать их в ближайшие 5 лет. Среди этих проектов только один (Великобритания, Ellsworth Lake Drilling [17]) направлен на отбор донных осадков (не более 10 см) подледникового озера в Западной Антарктиде, в остальных (США, Rapid Access Ice Drilling Project и Китай, Gamburtsev Drilling Project) декларируется намерение изучить древние комплексы, подстилающие Восточную Антарктиду.

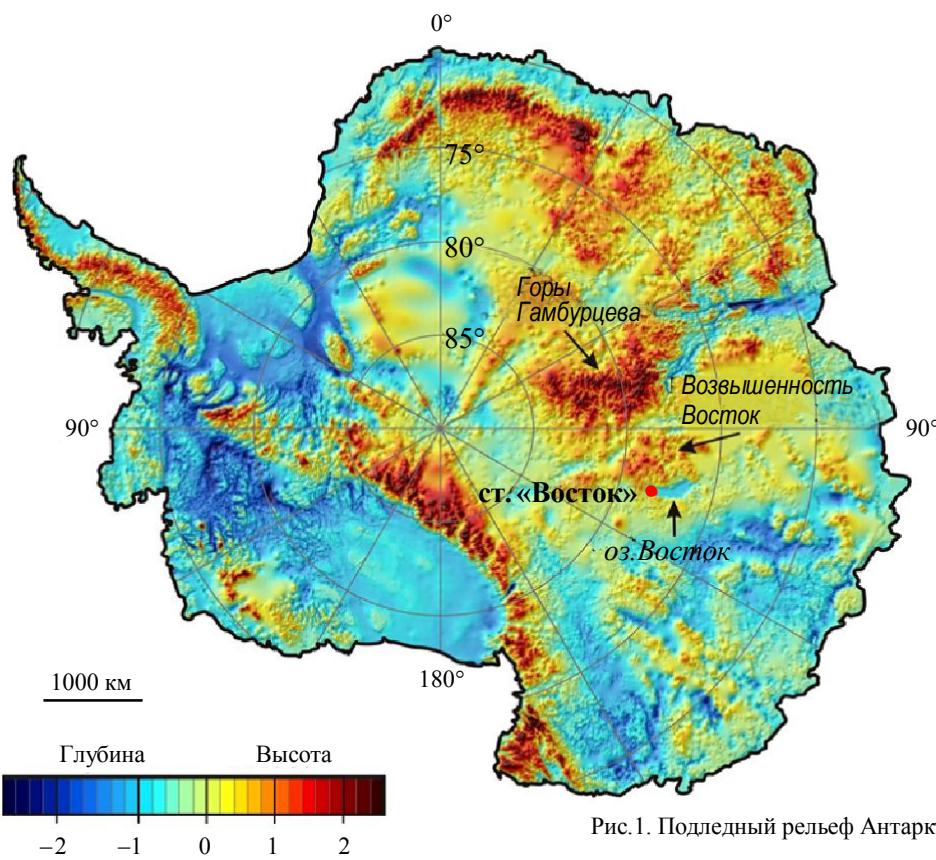


Рис.1. Подледный рельеф Антарктиды [12]

Полевые работы пока проводились только Великобританией, но были прекращены на самой ранней стадии из-за технических проблем. Необходимость бурения в Антарктике для решения геологических задач отмечена в Стратегии развития деятельности Российской Федерации в Антарктике на период до 2020 г. и на более удаленную перспективу, утвержденной распоряжением Правительства РФ от 30 октября 2010 г. № 1926-р. В Стратегии указано, что «традиционные геофизические методы исследования осадочного чехла континента могут быть дополнены наиболее эффективными методами стратиграфического бурения...». Учитывая имеющийся опыт наших работ и существующую инфраструктуру РАЭ, наиболее целесообразным и эффективным будет использование пробуренной на станции «Восток» скважины 5Г с целью изучения подледникового озера Восток. Это позволит не только получить абсолютно уникальную информацию по различным научным дисциплинам, но и в немалой степени укрепит престиж нашей страны в антарктических исследованиях. Жесткие требования обеспечения экологической безопасности работ при исследовании озера и взятии проб донных отложений исключают использование обычной технологии бурения, так как при этом вода озера будет загрязнена заливочной жидкостью из скважины. В связи с этим требуется разработка пробоотборников в соответствии с основной концепцией технологии исследования подледникового озера Восток [19].

**Подледниковое озеро Восток.** Озеро расположено под мощным (3700-4000 м) ледниковым покровом Антарктиды на значительном (более 1000 км) удалении от ее берегов в пределах стабильной в тектоническом отношении платформы Восточной Антарктиды [14] (рис.1). Оно занимает обширную депрессию коренного ложа материка длиной около 300 км и шириной от 40 до 80 км. Средняя глубина озера, согласно сейсмическим данным, составляет около 1000 м ниже уровня моря и 1200-1500 м относительно его берегов [9].

После проведения геофизических исследований в районе озера Восток было высказано предположение, что вмещающая его депрессия представляет собой звено обширной позднепалеозойско-раннемезозойской рифтовой системы, протягивающейся от побережья моря Содружества вдоль подножия гор Гамбурцева в высокоширотную область Центральной Антарктиды [1, 16].

Сейсмические исследования, выполненные в южной части озера Восток, показывают, что осадки имеют небольшую мощность – десятки, возможно, первые сотни метров, и подстилаются породами кристаллического фундамента [6, 12]. Это свидетельствует о низкой скорости и(или)



достаточно коротком периоде седиментации, а также противоречит предположениям о древнем заложении депрессии озера, так как в этом случае она была бы заполнена терригенными отложениями достаточно большой (километры) мощности.

Исследования керна скважины показали, что в основании ледниковой толщи атмосферного происхождения на глубине 3538 м залегает слой льда мощностью 230 м, образовавшийся в результате намерзания озерной воды на подошву медленно движущегося ледника. Верхняя часть этого слоя на глубине от 3538 до 3608 м насыщена минеральными, неравномерно распределенными (от 2-3 до 25 на 1 м керна) включениями размером 1-2 мм (иногда до 1 см). Предполагается, что они были захвачены во время образования конжеляционного слоя льда, когда ледник пересекал мелководный прибрежный участок озера Восток, расположенный к северо-западу от скважины, и отражают состав его донных осадков [12]. После стабилизации оледенения около 14 млн лет назад ледовый щит Центральной Антарктиды характеризовался холодным «сухим» ложем и ледниковая эрозия в Центральной Антарктиде была крайне незначительной или отсутствовала [18]. Ледниковые отложениями (т.е. отложения, образовавшиеся за счет ледового переноса) могли накапливаться в периоды среднеплиоценового (около 3,3-3,0 млн лет) и позднемиоценовых (10,5-8,5 и 6,4-5,9 млн лет) потеплений климата, когда менялись условия в подошве ледовой толщи, способствовавшие экзарации коренных пород, перемещению обломочного материала и его выпадению в водной среде озера Восток. Темпы седиментации все же были очень незначительными и, вероятно, не превышали миллиметры – первые сантиметры за миллион лет. Большая часть осадочного чехла озера Восток, вероятно, формировалась в период антарктического оледенения с динамичным ледниковым покровом, существовавшим до 14 млн лет назад. В периоды ледниковых максимумов осадконакопление в оз. Восток отсутствовало или было очень незначительным, таким образом, олигоценовый – среднемиоценовый разрез представлен чередованием слоев, в основном отвечающих циклам потепления и максимального сокращения ледникового покрова. В накопление осадочной толщи озера Восток определенный, но вероятно очень незначительный вклад могут вносить хемогенные процессы с образованием аутигенных минералов. Во включениях, изученных в кернах конжеляционного льда, обнаружены мелкие кристаллы сульфидов (пирита, молибденита, сфалерита), образование которых связывается с гидротермальной деятельностью, и карбонатов (арagonита, кальцита), кристаллизующихся в пресной воде, в достаточном количестве насыщенной ионами  $\text{Ca}_2$  и  $\text{CO}_3$ , т.е. вода предположительно слабощелочная [6]. Существование карбонатов имеет большое значение, так как их присутствие в осадках позволит датировать осадочные отложения, лишенные остатков флоры и фауны.

Максимальный возраст осадочной толщи соответствует времени образования самой депрессии озера Восток, возникшей в начале или в процессе развития антарктического оледенения, что необходимо учитывать при рассмотрении обстановок седиментации и состояния природной среды. Если депрессия имеет тектоническую природу, то ее развитие сопровождалось повышенным тепловым потоком, особенно на ранней стадии. Это существенно влияло на базальные температуры, продуцирование талой воды и динамику ледника, создавая более благоприятные условия для экзарации ложа и ускоряя процессы осадконакопления в развивающейся депрессии озера Восток [14]. В дальнейшем, когда главная тектоническая фаза завершилась, активный эндогенный режим мог поддерживаться за счет регулярных изостатических движений земной коры. На рис.2 представлен прогнозный геологический разрез южной части озера Восток вместе с имеющимися данными о глобальных изменениях климата и периодах потепления (дегляциаций) в позднем кайнозое, которым, как предполагается, соответствовали импульсы поступления обломочного материала в озеро Восток.

Осадки озера Восток содержат уникальную информацию о геологии, природной среде и климатических изменениях Центральной Антарктиды. Представления о геологии этого региона, в основном, базируются на геофизических данных и экстраполяциях наблюдений из обнаженных районов в подледные пространства. Климат и палеогеографические обстановки прошлого изучаются по результатам бурения в океанах и математического моделирования. Опробование дна озера Восток – это возможность получить эксклюзивный научный материал, который существенно расширит наши знания по многим научным направлениям. Отбор даже самого верхнего (первые сантиметры) слоя донных отложений будет иметь огромное научное значение. Как уже отмечалось, этот слой может состоять из тонкодисперсной (глинисто-алевритовой) фракции, изучение глинистых минералов позволит

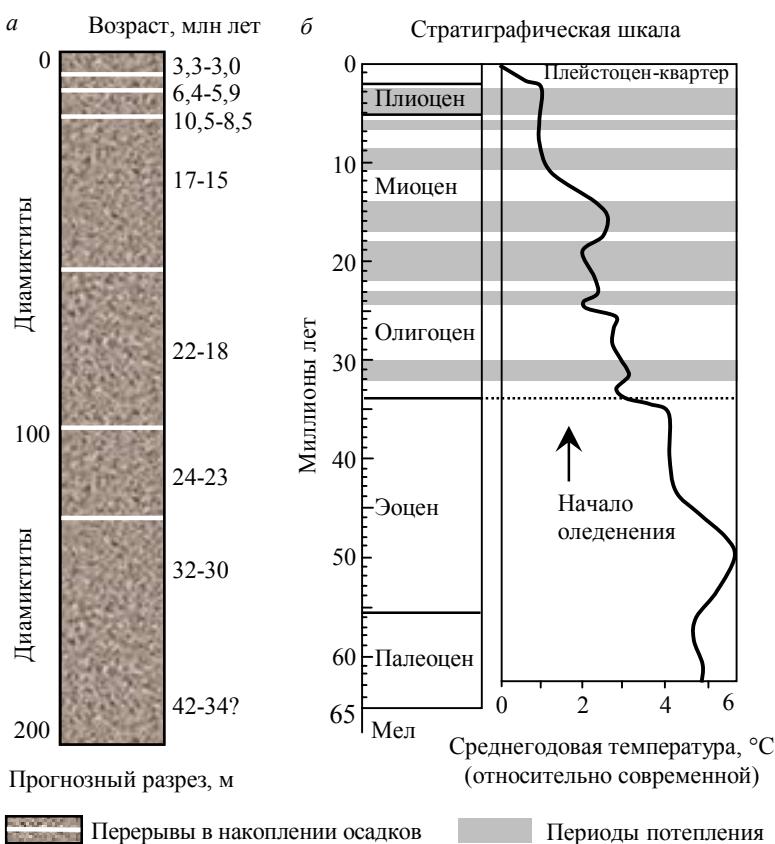


Рис. 2. Прогнозный геологический разрез осадочного чехла южной части озера Восток (а) и глобальные изменения климата (б) [11]

представление о составе источников сноса, в качестве которого рассматриваются подледниковые горы Гамбурцева в Центральной Антарктиде. Опробование первых метров – десятков метров выявит стратификацию осадочного разреза, обусловленную сменой режимов седиментации, которая, в свою очередь, должна коррелироваться с флюктуациями динамики ледникового покрова и климата. Большой объем осадочного материала расширит возможности для реконструкции геологического строения источников сноса, расположенных в Центральной Антарктиде. Важным направлением исследований также является поиск микроорганизмов. Подледная среда Центральной Антарктики, включая озеро Восток, более 30 млн лет находится в изолированном от земной атмосферы состоянии и не имеет связи с внешней окружающей средой, поэтому здесь могли возникнуть совершенно неизвестные микробиологические формы, которые сохранились в осадочных слоях.

**Технология стерильного отбора проб донных отложений озера Восток.** Предлагаемый способ проникновения в озеро Восток [19] предусматривает, прежде всего, использование физических особенностей состояния системы «ледниковый покров – подледное озеро Восток». Фундаментальным является тот факт, что толща ледника находится в плавучем состоянии, и давление на границе «лед – вода» соответствует весу столба льда (горному давлению). При бурении льда горное давление компенсируется гидростатическим давлением заливочной жидкости в скважине. Уменьшая количество заливочной жидкости, можно обеспечить недокомпенсацию горного давления, т.е. создать такие условия, когда давление воды озера в данной точке будет превышать давление столба заливочной жидкости. При таких условиях в момент контакта забоя скважины с поверхностью озера заливочная жидкость должна вытесняться озерной водой вверх по стволу скважины на высоту, соответствующую недокомпенсации горного давления.

Главным условием проведения исследований подледникового озера является обеспечение экологической безопасности работ. В воду озера не должны попасть современные микроорганизмы и опасные вещества (керосин и фреон). Аппаратура, опускаемая в воду озера, не должна контактировать с заливочной жидкостью в скважине в процессе ее доставки к поверхности озера.

выявить условия их происхождения и обстановки осадконакопления в озере Восток. Кроме того, могут быть получены дополнительные доказательства наличия гидротермальной деятельности, которое пока предполагается по косвенным признакам (единичной находке генов термофильной бактерии, соотношению изотопа кислорода в конжеляционном льду, общей минерализации воды озера Восток).

Изучение морфологии минеральных зерен (в первую очередь, кварца – наиболее распространенного минерала во включениях) позволит определить характер переноса терригенных минералов, влияние подледного стока и длительность переноса. Изучение обломков горных пород даст прямую информацию о составе коренного ложа на западном побережье озера Восток, откуда происходил снос терригенного материала. Изучение изотопно-геохимических характеристик и возраста дегритовых урансодержащих минералов позволит расширить



На рис.3 показана схема расположения доставочного узла в скважине в рабочем положении у поверхности озера. Для обеспечения предъявляемых требований в процессе доставки к поверхности озера аппаратура будет помещена в герметичный корпус, давление внутри которого должно быть равно атмосферному давлению на поверхности. Этот модуль должен быть помещен в изолированный от окружающей среды отсек доставочного снаряда, который, как и измерительный модуль, должен быть обработан на поверхности для исключения загрязнения озера.

При достижении рабочей зоны доставочный снаряд останавливается на высоте 1-2 м от поверхности озера и из него спускается измерительный модуль на тонком тросе, намотанном на катушку малогабаритной лебедки, установленной в верхней части герметичного отсека.

Надежно предотвратить замерзание столба жидкости, находящейся в скважине, и сужение ствола скважины в рабочей зоне возможно лишь при прогреве всего столба воды с небольшим перекрытием (1 м) границы «заливочная жидкость – вода». Это может быть достигнуто размещением по всей длине устройства нагревательных элементов, которые будут поддерживать в рабочей зоне необходимую температуру в процессе всего времени проведения наблюдений.

Для получения проб донных отложений исследовательский модуль будет заменен пробоотборником. Возможны два варианта работы исследовательской аппаратуры или пробоотборника: автономный и управляемый с поверхности.

Автономный режим работы будет применен при использовании тонкого троса (нити) диаметром около 1 мм для подвешивания спускаемого в озеро модуля, так как при этом отсутствует канал связи исследовательского модуля и дневной поверхности. Все работы будут производиться в автоматическом режиме, а электроэнергия будет подаваться от электрических батарей.

При использовании груzonесущего кабеля для связи спускаемого модуля с доставочным устройством появляется возможность управлять работой аппаратуры с поверхности, но при этом значительно увеличится длина барабана лебедки доставочного устройства. При диаметре груzonесущего кабеля 3-4 мм длину барабана лебедки необходимо увеличить примерно в 10 раз, что ставит практически непреодолимые препятствия для создания такого механизма. Разработка груzonесущего кабеля диаметром 2 мм делает эту задачу реальной.

Для взятия проб донных отложений рассматриваются различные варианты технических устройств: буровые стаканы, динамически уравновешенный буровой снаряд (ДУБС) [2], подводная автоматическая буровая установка, установка обсадной колонны между ледовой скважиной и дном озера для бурения колонковым снарядом на груzonесущем кабеле.

**Динамически уравновешенный буровой снаряд.** Использование ДУБС позволяет выполнить вращательное бурение без опоры на стенки скважины для восприятия реактивного момента. С помощью такого бурового снаряда можно получить керн, равный длине его колонковой трубы, но повторно попасть в эту скважину будет также сложно, как и при использовании буровых стаканов.

Буровой снаряд представляет собой двухмассовую колебательную электромеханическую систему возвратно-вращательного движения (ВВД) с двумя степенями свободы (рис.4). Статорная часть 5 погружного маслозаполненного электродвигателя соединена с роторной частью (1, 2, 4) упругим элементом 5 (параллельно соединенными пружинами кручения). Отличительной осо-

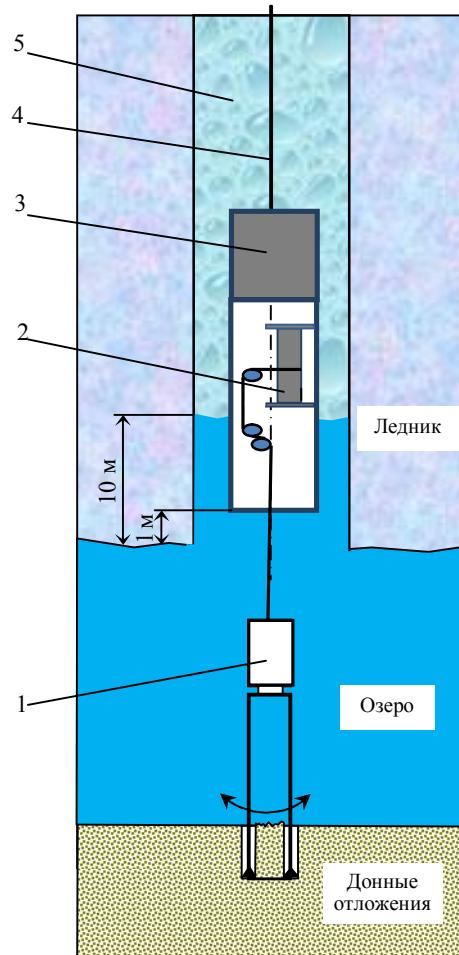


Рис.3. Схема работы динамически уравновешенного бурового снаряда при отборе проб донных отложений подледникового озера

1 – буровой снаряд; 2 – лебедка;  
3 – доставочный снаряд; 4 – груzonесущий кабель;

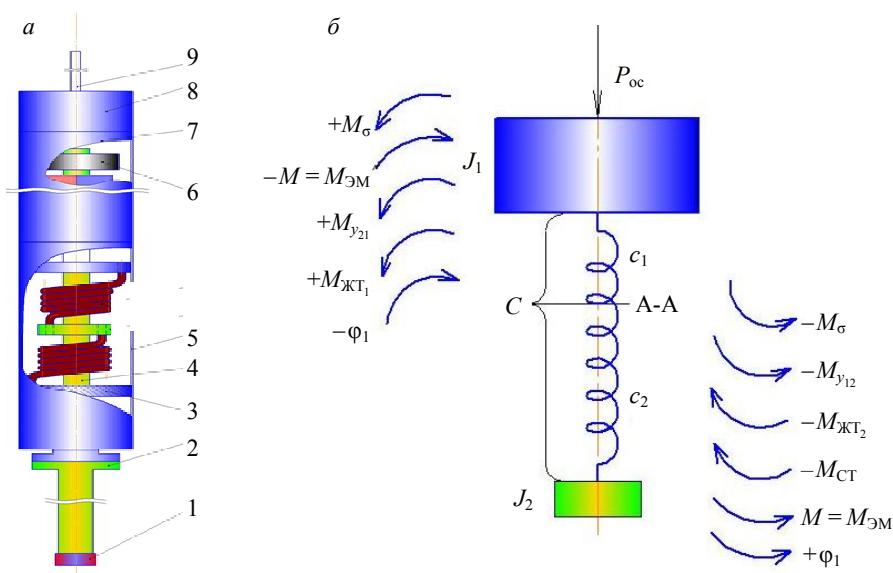


Рис.4. Конструктивная (а) и расчетная (б) схемы динамически уравновешенного бурowego снаряда

1 – буровая коронка; 2 – колонковая труба; 3 – корпус ЭД; 4 – вал ротора ЭД; 5 – упругий элемент (пружина кручения);  
6 – бесконтактный датчик скорости ВВД; 7 – статор вентильного электродвигателя; 8 – кабельный замок;  
9 – грузонесущий кабель

бенностью бурового снаряда от известных являются отсутствие распорной системы, воспринимающей реактивный момент при работе коронки на забое, что упрощает конструкцию и обеспечивает надежную работу снаряда на дне при бурении донных осадков.

На рис.4, б представлена расчетная схема ДУБС, где статорная часть с моментом инерции  $J_1$  под действием электромагнитного момента ЭД  $M_{\text{ЭМ}}$  перемещается на угол  $\varphi_1$  в неподвижной системе координат. Роторная часть с моментом инерции  $J_2$  под действием того же электромагнитного момента  $M_{\text{ЭМ}}$  поворачивается на угол  $\varphi_2$  в противоположном направлении. Возвратно-вращательное движение статорной части относительно роторной происходит относительно неподвижного узлового сечения А-А упругого элемента, расположение которого зависит от соотношения моментов инерции и нагрузок на статорную и роторную части ДУБС.

Со стороны упругого элемента, представленного пружиной кручения с жесткостью  $c$ , на статорную  $J_1$  и роторную  $J_2$  части действуют упругие моменты  $M_{y_{12}} = M_{y_{21}}$ , определяемые углом закручивания пружины кручения и коэффициентом жесткости. Со стороны буровой коронки и колонковой трубы на роторную часть с моментом инерции  $J_2$  и на статорную часть ДУБС с моментом инерции  $J_1$  действуют момент сопротивления  $M_c$  в виде аддитивной комбинации вязкого и сухого трений, а также случайной составляющей момента нагрузки  $M_\sigma$ .

При работе на резонансной частоте электромеханической системы амплитуды колебаний имеют максимальные значения, а сумма моментов вращения, действующих на эти части, равна нулю, т.е. буровой снаряд является динамически уравновешенным.

Для построения математической модели системы целесообразно воспользоваться уравнениями Лагранжа второго рода, где за обобщенные координаты принимаются углы поворота статорной  $\varphi_1$  и роторной  $\varphi_2$  частей,

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial D}{\partial \dot{q}_i} + \frac{\partial \Pi}{\partial q_i} = Q_i, \quad (1)$$

$$q_1 = \varphi_1; q_2 = \varphi_2,$$

где  $T$  – кинетическая энергия системы;  $\Pi$  – потенциальная энергия системы;  $D$  – диссипативная функция системы;  $Q_i$  – обобщенные силы.

Кинетическая энергия системы

$$T = \frac{1}{2} J_1 \varphi_1^2 + \frac{1}{2} J_2 \varphi_2^2. \quad (2)$$



Потенциальная энергия системы

$$\Pi = \frac{1}{2}c(\varphi_1 - \varphi_2)^2 = \frac{1}{2}c\varphi_1^2 - c\varphi_1\varphi_2 + \frac{1}{2}c\varphi_2^2. \quad (3)$$

Диссипативная энергия системы

$$D = \frac{1}{2}\mu_1\dot{\varphi}_1^2 + \frac{1}{2}\mu_2\dot{\varphi}_2^2. \quad (4)$$

Учитывая особенности системы – равные и разнонаправленные моменты  $M$ , действующие на роторную и статорную части колебательной электромеханической системы с резонансной частотой  $\omega_p \approx \omega_0$ , наличие узлового сечения О-О<sub>1</sub>, в котором  $\varphi = 0$ , можно записать

$$\omega_0^2 = \frac{c_1}{J_1} = \frac{c_2}{J_2}. \quad (5)$$

Так как пружины кручения с коэффициентами жесткости  $c_1$  и  $c_2$  являются частями одной пружины и соединены последовательно, то коэффициент жесткости с этой пружины определяется выражением

$$\frac{1}{c} = \frac{1}{c_1} = \frac{1}{c_2}, \quad (6)$$

откуда

$$c = \frac{c_1 c_2}{c_1 + c_2}. \quad (7)$$

С учетом выражения (5)

$$c = \omega_0^2 \frac{J_1 J_2}{J_1 + J_2} = \omega_0^2 J_{\Sigma}, \quad (8)$$

где

$$J_{\Sigma} = \frac{J_1 J_2}{J_1 + J_2}.$$

Тогда

$$\omega_0^2 = \frac{c_1}{J_1} = \frac{c_2}{J_2} = \frac{c}{J_{\Sigma}}. \quad (9)$$

Для координаты  $\varphi_1$ :

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}_1} \right) = J_1 \ddot{\varphi}_1; \quad \frac{\partial D}{\partial \varphi_1} = \mu_1 \dot{\varphi}_1; \quad \frac{\partial \Pi}{\partial \varphi_1} = c\varphi_1 = c\varphi_2 = c(\varphi_1 - \varphi_2); \quad \frac{\partial T}{\partial \varphi_1} = 0. \quad (10)$$

Для координаты  $\varphi_2$ :

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}_2} \right) = J_2 \ddot{\varphi}_2; \quad \frac{\partial D}{\partial \varphi_2} = \mu_2 \dot{\varphi}_2; \quad \frac{\partial \Pi}{\partial \varphi_2} = -c\varphi_1 + c\varphi_2; \quad \frac{\partial T}{\partial \varphi_2} = 0. \quad (11)$$

Уравнения движения ДУБС:

$$\begin{cases} J_1 \ddot{\varphi}_1 + \mu_1 \dot{\varphi}_1 + c\varphi_1 - c\varphi_2 = M, \\ J_2 \ddot{\varphi}_2 + \mu_2 \dot{\varphi}_2 + c\varphi_2 - c\varphi_1 = -M, \end{cases} \quad (12)$$

где  $M = A \cos \omega_0 t$ .

Приводя (12) к стандартной форме, получим



$$\begin{cases} \ddot{\varphi}_1 + \frac{\mu_1}{J_1} \dot{\varphi}_1 + \frac{c}{J_1} \varphi_1 - \frac{c}{J_1} \varphi_2 = \frac{M}{J_1}; \\ \ddot{\varphi}_2 + \frac{\mu_2}{J_2} \dot{\varphi}_2 + \frac{c}{J_2} \varphi_2 - \frac{c}{J_2} \varphi_1 = \frac{M}{J_2}. \end{cases} \quad (13)$$

Обозначим

$$\eta_1 = \frac{\mu_1}{J_1}; \quad \eta_2 = \frac{\mu_2}{J_2}; \quad M_1 = \frac{M}{J_1}; \quad M_2 = \frac{M}{J_2}; \quad k_1 = \omega_0^2 \frac{J_1}{J_1 + J_2}; \quad k_2 = \omega_0^2 \frac{J_2}{J_1 + J_2}.$$

Тогда уравнение (13) примет вид

$$\begin{cases} \ddot{\varphi}_1 + \eta_1 \dot{\varphi}_1 + k_2 \varphi_1 - k_2 \varphi_2 = M_1; \\ \ddot{\varphi}_2 + \eta_2 \dot{\varphi}_2 + k_1 \varphi_2 - k_1 \varphi_1 = M_2. \end{cases} \quad (14)$$

Уравнение (14) позволяет проводить анализ нормальных режимов (нагрузка сосредоточена на буровой коронке, а на статорной части не превышает 5-10 %), аномальных и аварийных режимов работы ДУБС (работа в вязкой среде, заклинивание статорной или роторной частей бурового снаряда), а также исследовать симметричные режимы работы.

Полученная система имеет одну резонансную частоту  $\omega_0$  и две парциальные частоты  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  колебательных систем с одной степенью свободы, из которых состоит исходная система, при этом

$$\lambda_1 < \lambda_2 < \omega_0. \quad (15)$$

При заклинивании статорной или роторной частей ДУБС резонансная частота электромеханической системы становится равной парциальной частоте  $\lambda_1$  или  $\lambda_2$  соответственно. Парциальная частота  $\lambda_2$  при заклинивании статорной части ДУБС ( $J_1 \rightarrow \infty$ )

$$\lambda_2 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{c}{J_2}}. \quad (16)$$

Теоретический угол размаха колебаний буровой коронки относительно неподвижных осей, связанных с Землей, определяется выражением

$$\varphi_k = \varphi_{\Pi} \frac{J_1}{J_1 + J_2},$$

где  $\varphi_{\Pi} = 180$  – теоретически допустимый угол поворота ротора (размах колебаний) относительно статора, град.

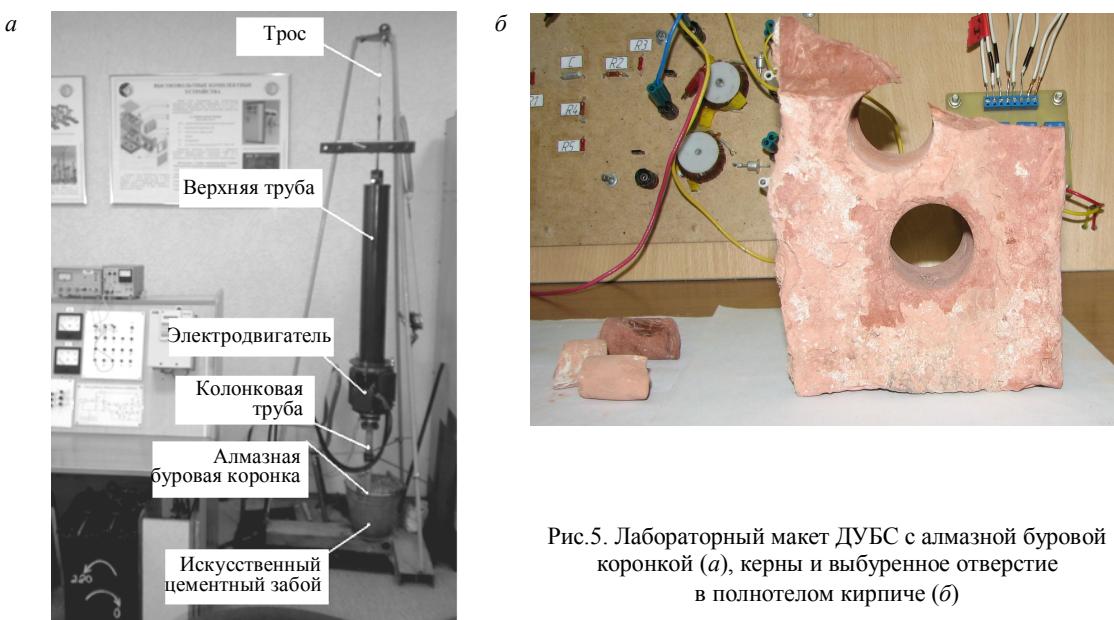


Рис.5. Лабораторный макет ДУБС с алмазной буровой коронкой (а), керны и выбуренное отверстие в полнотелом кирпиче (б)



Режимы авторезонансных колебаний электропривода ВВД должны быть нечувствительны к изменениям динамических параметров (коэффициента жесткости с упругого элемента, моментов инерции  $J$ ), а также к величине и характеру нагрузки.

Стендовые исследования симметричных и несимметричных режимов на имитационной модели и на физическом макете электропривода ДУБС (рис.5) подтвердили устойчивость резонансных автоколебаний с комбинированной нагрузкой и инвариантность в широком диапазоне к изменениям динамических параметров

**Заключение.** Опробование дна озера Восток – это возможность получить эксклюзивный научный материал, который существенно расширит наши знания по многим научным направлениям. Отбор даже самого верхнего (первые сантиметры) слоя донных отложений будет иметь огромное научное значение. Исследования проб донных отложений подледникового озера Восток позволят получить данные, с помощью которых будет уточнена гипотеза о том, что вмещающая озеро Восток депрессия представляет собой звено обширной позднепалеозойско-раннемезозойской рифтовой системы, протягивающейся от побережья моря Содружества вдоль подножия гор Гамбурцева в высокоширотную область центральной Антарктиды.

Наиболее целесообразным для проведения исследования подледникового озера Восток представляется использование уже пробуренной скважины 5Г, где ведутся исследования, направленные на технологии вскрытия и поддержания в рабочем состоянии скважины в процессе изучения озера Восток.

Работы по созданию технических средств для отбора донных отложений находятся на начальном этапе, однако анализ вариантов технических решений для получения проб донных отложений, имеющих различную степень сложности, позволяет высказать уверенность в осуществимости данного проекта.

**Благодарность.** Авторы благодарят Российскую антарктическую экспедицию за логистическое обеспечение данных работ, которые выполнялись при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № НК 14-05-93107/16 и № 15-05-413.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Геологическая природа подледникового озера Восток в Восточной Антарктиде / Г.Л.Лейченков, Б.В.Беляцкий, А.М.Попков, С.В.Попов // Материалы гляциологических исследований. 2004. № 98. С. 81-92.
2. Загривный Э.А. Динамически уравновешенный буровой снаряд на груzonесущем кабеле с асинхронным электроприводом возвратно-вращательного движения / Э.А.Загривный, В.А.Соловьев; Материалы 6-й межрегион. научно-практ. конф. «Освоение минеральных ресурсов Севера: проблемы и решения» // Народное хозяйство Республики Коми. 2008. Т. 17. № 1. С. 101-104.
3. Котляков В.М. Глубокое бурение в Центральной Антарктиде и проникновение в подледное озеро Восток / В.М.Котляков, В.Я.Липенков, Н.И.Васильев // Вестник РАН. 2013. Т. 83. № 7. С. 591-605.
4. Кудряшов Б.Б. Бурение скважин в условиях изменения агрегатного состояния горных пород / Б.Б.Кудряшов, В.К.Чистяков, В.С.Литвиненко. Л.: Недра, 1991. 295 с.
5. Кудряшов Б.Б. Бурение ледникового покрова Антарктиды тепловым способом / Б.Б.Кудряшов, В.К.Чистяков, В.А.Морев // 25 лет Советской антарктической экспедиции. Л.: Гидрометеоиздат, 1983. С. 149-158.
6. Лейченков Г.Л. Прогнозный осадочный разрез подледникового озера Восток / Г.Л.Лейченков, А.М.Попков // Лед и снег. 2012. № 4(120). С. 21-30.
7. Литвиненко В.С. Уникальные техника и технология бурения скважин во льдах Антарктиды // Записки Горного института. 2014. Т. 210. С. 5-10.
8. Отечественные сейсмические, радиолокационные и сейсмологические исследования подледникового озера Восток / С.В.Попов, В.Н.Масолов, В.В.Лукин, А.М.Попков // Лед и снег. 2012. № 4(120). С. 31-38.
9. Результаты и особенности бурения скважины 5Г и первого вскрытия озера Восток / Н.И.Васильев, В.Я.Липенков, А.Н.Дмитриев, А.В.Подоляк, В.М.Зубков // Лед и снег. 2012. № 4 (120). С. 12-20.
10. Large deep freshwater lake beneath the ice of central East Antarctica / A.P.Kapitsa, J.K.Ridley, G. de Q.Robin, M.J.Sieger, I.A.Zotikov // Nature. 1996. Vol. 381. № 6584. P. 684-686.
11. Barrett P.J. Cooling a continent // Nature. 2003. Vol. 421. P. 221-223.
12. Bedmap 2: Improved ice bed, surface and thickness datasets for Antarctica / P.Fretwell, H.D.Pritchard, D.G.Vaughan, J.L.Bamber, N.E.Barrand, R.Bell, C.Bianchi, R.G.Bingham, D.D.Blankenship, G.Casassa, G.Catania, D.Callens, H.Conway, A.J.Cook, H.F.J.Corr, D.Damaske, V.Damm, F.Ferraccioli, R.Forsberg, S.Fujita, Y.Gim, P.Gogineni, J.A.Griggs, R.C.A.Hindmarsh, P.Holmlund, J.W.Holt, R.W.Jacobell, A.Jenkins, W.Jokat, T.Jordan, E.C.King, J.Kohler, W.Krabill, M.Riger-Kusk, K.A.Langley, G.Leitchenkov, C.Leuschen, B.P.Luyendyk, K.Matsuoka, J.Mouginot, F.O.Nitsche, Y.Nogi, O.A.Nost, S.V.Popov, E.Rignot, D.M.Rippin, A.Rivera, J.Roberts, N.Ross, M.J.Sieger, A.M.Smith, D.Steinhage, M.Studinger, B.Sun, B.K.Tinto, B.C.Welch, D.Wilson, D.A.Young, C.Xiangbin, A.Zirizzotti // The Cryosphere. 2013. Vol. 7. P. 375-393.



13. Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica / J.R.Petit, J.Jouzel, D.Raynaud, N.I.Barkov, J.M.Barnola, I.Basile, M.Bender, J.Chappellaz, M.Davis, G.Delaygue, M.Delmotte, V.M.Kotlyakov, M.Le-grand, V.Ya.Lipenkov, C.Lorius, L.Pepin, C.Ritz, E.Saltzman, M.Stievenard // Nature. 1999. Vol. 399. N 6735. 3 June. P. 429-436.
14. De Conto R.M. Rapid Cenozoic glaciation of Antarctica induced by declining atmospheric CO<sub>2</sub> / R.M.De Conto, D.Pollard // Nature. 2003. Vol. 421. P. 245-249
15. Deep drilling at Vostok station, Antarctica: history and last events / N.I.Vasiliev, P.G.Talalay, N.E.Bobin, V.K.Chistyakov, V.M.Zubkov, A.V.Krasilev, A.N.Dmitriev, S.V.Yankilevich, V.Ya.Lipenkov // Annal. Glaciol. Vol. 47. 2007. P. 10-23.
16. East Antarctic rifting triggers uplift of the Gamburtsev Mountains / F.Ferraccioli, C.A.Finn, T.A.Jordan, R.E.Bell, L.M.Anderson, D.Damaske // Nature. 2011. Vol. 479. P. 388-394.
17. Exploration of Ellsworth Subglacial Lake: a concept paper on the development, organisation and execution of an experiment to explore, measure and sample the environment of a West Antarctic subglacial lake / M.J.Siegent, A.Behar, M.Bentley, D.Blake, S.Bowden, P.Christoffersen, C.Cockell, H.Corr, D.C.Cullen, H.Edwards, A.Ellery, C.Ellis-Evans, G.Griffiths, R.Hindmarsh, D.A.Hodgson, E.King, H.Lamb, L.Lane, K.Makinson, M.Mowlem, J.Parnell, D.A.Pearce, J.Priscu, A.Rivera, M.A.Sephton, M.R.Sims, A.M.Smith, M.Tranter, J.L.Wadham, G.Wilson, J.Woodward // Rev Environ Sci BioTechnol, 2006. DOI: 10.1007/s11157 006-9109-9.
18. Jamieson S.S.R. The evolution of the subglacial landscape of Antarctica / S.S.R.Jamieson, D.E.Sugden, N.R.J.Hulton // Earth Planetary Science Letters. 2010. Vol. 293. P. 1-27.
19. Lukin V.V. Technological aspects of the final phase of drilling borehole 5G and unsealing Vostok Subglacial Lake, East Antarctica / V.V.Lukin, N.I.Vasiliev // Annal. Glaciol. 2014. 55(65). P. 83-89.
20. Proposal for penetration and exploration of sub-glacial Lake Vostok, Antarctica / S.R.Verkulich, B.B.Kudryashov, N.I.Barkov, N.I.Vasiliev, R.N.Vostretsov, A.N.Dmitriev, V.M.Zubkov, A.V.Krasilev, P.G.Talalay, V.Ya.Lipenkov, L.M.Savatyugin, I.N.Kuz'mina // Mem. Natl. Inst. Polar Research. 2002. Vol. 56. P. 245-252.

**Авторы:** Н.И.Васильев, д-р техн. наук, заведующий кафедрой, vasilev\_n@mail.ru (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия), Г.Л.Лейченков, д-р геол.-минерал. наук, профессор, german\_l@mail.ru (Институт наук о Земле, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия), Э.А.Загривный, д-р техн. наук, профессор, zagrivniy@yandex.ru (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия).

Статья принята к публикации 1.12.2016.