



Научная статья
УДК 550.822.7

Перспективное технологическое решение по отбору проб донных отложений подледникового озера Восток: актуальность и постановка задач исследований

А.В.БОЛЬШУНОВ¹✉, **Н.И.ВАСИЛЬЕВ¹**, И.П.ТИМОФЕЕВ¹, С.А.ИГНАТЬЕВ¹, Д.А.ВАСИЛЬЕВ¹, Г.Л.ЛЕЙЧЕНКОВ^{2,3}

¹ Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

² ВНИИОкеангеология, Санкт-Петербург, Россия

³ Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

Как цитировать эту статью: Перспективное технологическое решение по отбору проб донных отложений подледникового озера Восток: актуальность и постановка задач исследований / А.В.Большунов, **Н.И.Васильев**, И.П.Тимофеев, С.А.Игнатьев, Д.А.Васильев, Г.Л.Лейченко // Записки Горного института. 2021. Т. 252. С. 779-787. DOI: 10.31897/PMI.2021.6.1

Аннотация. Подледниковое озеро Восток в Антарктиде является уникальным природным объектом, всестороннее исследование которого предполагает отбор проб воды и пород донной поверхности. Для дальнейшего изучения озера необходимо бурение новой скважины доступа и разработка экологически безопасных технологий его исследования. В статье рассмотрены реализованные, а также находящиеся в стадии разработки технологии отбора проб пород донной поверхности подледниковых озер. Все рассмотренные технологии соответствуют требованиям экологической безопасности ведения работ и обеспечивают отбор проб. Авторами предложена альтернативная технология, основанная на использовании шагающего устройства и благодаря своей мобильности позволяющая произвести селективный отбор проб пород с большой площади, используя при этом только одну скважину доступа. Рассмотрены основные задачи, которые необходимо решить для реализации предложенной технологии. Материалы представлены коллективом авторов, имеющих многолетний опыт буровых работ на станции «Восток» в Антарктиде и опытно-конструкторских работ по проектированию оборудования и нестандартных средств механизации для сложных горно-геологических и климатических условий.

Ключевые слова: Антарктида; озеро Восток; подледниковый водоем; скважина доступа; отбор проб; шагающее устройство; донные отложения

Благодарность. Исследование выполнено с помощью субсидии на выполнение государственного задания в сфере научной деятельности на 2021 г. № FSRW-2021-0011.

Принята: 30.11.2021

Онлайн: 27.12.2021

Опубликована: 27.12.2021

Введение. Озеро Восток в Антарктиде является уникальным природным объектом, интерес к которому, возникший с момента его открытия [13], не ослабевает до сих пор. На сегодняшний день, благодаря проведенным геофизическим исследованиям, известны мощность ледника над озером, глубина озера, рельеф дна и береговая линия [5-7, 24].

Следующий шаг в изучении озера предполагает мониторинг его водной толщи и донной поверхности, отбор проб воды и пород придонного осадочного слоя. Первые представления о составе донных осадков были получены при вскрытии конжеляционного слоя льда скважиной 5Г, где были обнаружены мелкие (от 0,1 до 1 см) минеральные включения, захваченные ледником при его движении через западную мелководную часть озера [2, 21]. Также были изучены пробы озерной воды [8], полученные при первом вскрытии подледникового озера 5 февраля 2012 г. [4, 25]. Кроме того, бурение скважины 5Г и два вскрытия подледникового озера позволили:

- установить основные закономерности изменения структурных и физических свойств по глубине антарктического ледникового покрова;



Рис.1. Новый зимовочный комплекс для антарктической станции «Восток» [14]

- построить палеоклиматические ряды, реконструированные по результатам изучения ледяного керна;
- создать конкурентоспособные технологии бурения мощных ледовых толщ;
- обосновать экологически безопасную технологию вскрытия подледниковых водоемов.

Однако, для дальнейших исследований подледникового озера Восток использование существующей скважины 5Г не представляется возможным из-за применения в ней в качестве заливочной жидкости смеси керосина

и фреона, которая не позволяет обеспечить требуемую экологическую безопасность уникального природного объекта. Строительство новой станции «Восток» (рис.1) способствует сооружению современного бурового комплекса, позволяющего проводить буровые работы круглый год. Отличительной особенностью новых технологий бурения скважины доступа и исследования подледникового озера должен стать высокий уровень экологической безопасности проводимых работ.

При создании новых технологий и технических средств планируется широко использовать многолетний опыт специалистов Санкт-Петербургского горного университета в области разработки оборудования и технологий глубокого бурения во льдах [3, 23], потенциал кафедры бурения скважин [19], наработки геологов университета, изучающих Антарктиду [27, 32].

В данной статье рассмотрен один из возможных вариантов технологии отбора проб донной поверхности подледникового озера Восток.

Обзор технологий. На сегодняшний день существуют несколько технологий отбора проб донной поверхности подледниковых озер. Часть технологий предложена учеными Санкт-Петербургского горного университета в виде идей для обсуждения и возможной последующей реализации непосредственно для озера Восток [23]. Другая часть уже реализована на практике зарубежными исследователями, но для менее масштабных объектов по сравнению с озером Восток. Из наиболее интересных проектов можно отметить следующие проекты.

Проект WISSARD (Whillans Ice Stream Subglacial Access Research Drilling) – комплексный проект по изучению стабильности ледяных щитов и подледниковой геобиологии, осуществленный в западной Антарктиде, при финансовой поддержке Национального научного фонда США (NSF). Полевые исследования начались в летний сезон 2010-2011 гг. и продолжались до сезона 2013-2014 гг. Объектами исследования являлись нижняя часть ледника Уиланс на побережье Сипла, где ледник стекает с континента на морской шельф (море Росса), и подледниковое озеро Уиланс [40]. Озеро Уиланс расположено на глубине 800 м от поверхности ледника и имеет глубину около 2 м.

Основной задачей проекта WISSARD была оценка роли воды под западно-антарктическим ледником во взаимосвязанных гляциологических, геологических, микробиологических, геохимических, гидрологических и океанографических системах [34]. В рамках выполнения этой задачи, с помощью новой разработанной системы бурения горячей водой (HWDS) [13, 16, 17] в январе 2013 г. была пробурена скважина доступа, с помощью которой велось всестороннее исследование подледникового озера Уиланс. Перед спуском в скважину исследовательского научного оборудования изображения профиля скважины и донных отложений озера были изучены с помощью видеокамеры в режиме реального времени. Отбор проб донных отложений осуществлялся с помощью трех моделей пробоотборников. Несмотря на некоторые технические трудности, с которыми столкнулись исследователи озера Уиланс, удалось успешно добыть образцы подледниковых донных отложений (один керн длиной 0,8 м и диаметром 58 мм и керны длиной до 0,4 м) [37, 39], что позволило в дальнейшем провести их комплексный анализ в лабораторных условиях [22, 30].



В декабре 2012 г. британскими учеными под руководством Британской антарктической службы (BAS) была совершена попытка вскрытия подледникового озера Эллсворт с помощью специально разработанной технологии бурения горячей водой. В рамках проекта по изучению подледникового озера Эллсворт планировалось установить наличие, происхождение, развитие и поддержание жизни в озере Эллсворт с помощью отбора проб и их дальнейшего анализа [35].

После разработки и тестирования технологии чистого вскрытия и геофизического изучения озера [26] в летнем сезоне 2012-2013 гг. началось бурение скважины доступа. Отбор проб донных отложений планировалось осуществить с помощью ударного пробоотборника, разработанного BAS и компанией UWITEC [15]. Пробоотборник оснащен камерами и источниками света, что позволяет получать информацию о процессе отбора проб в режиме реального времени. Конструкция пробоотборника дает возможность добывать керны осадочных пород длиной до 3,8 м [12]. На протяжении полевых работ команда британских ученых сталкивалась с множеством трудностей, в результате чего вскрытие подледникового озера Эллсворт по разработанной технологии стало невозможно и 25 декабря 2012 г. попытки дальнейшего бурения были прекращены [11]. Несмотря на то, что британские исследователи потерпели неудачу при первой попытке достичь озера Эллсворт, полученный опыт, который они глубоко проанализировали, позволит им применить более удачные решения в дальнейших проектах.

SALSA (Subglacial Antarctic Lakes Scientific Access) – научный исследовательский проект, направленный на изучение подледниковой геобиологии, толщи воды и осадочного органического углерода, а также геологических процессов в подледниковом озере Мерсер. Озеро Мерсер расположено в месте слияния выводных ледников западной Антарктики на глубине около 1087 м от поверхности льда, глубина озера составляет 15 м. Проект проводится в западной Антарктиде при финансовой поддержке NSF. Полевые работы начались в летний сезон 2016-2017 гг. и продлились до сезона 2019-2020 гг. [33].

С помощью системы бурения горячей водой, ранее используемой в проекте WISSARD, 23 декабря 2018 г. было начато бурение скважины доступа, 26 декабря на глубине 1087 м скважина достигла озера Мерсер. Для добычи образцов донных отложений длиной менее 1 м применялась гравитационная система пробоотбора UWITEC (ранее использовалась при исследовании подледникового озера Уиланс [39]), 10 кернов длиной от 0,32 до 0,49 м были извлечены из скважины. Для отбора длинного керна осадочных пород был использован специально сконструированный пробоотборник, способный за счет большого веса и длинной колонковой трубы добывать керн длиной до 6,1 м. Первая попытка применения пробоотборника WHOI была неудачной, образцы осадочных пород выпали из пробоотборника при его подъеме на поверхность. Однако впоследствии с помощью гравитационного пробоотборника WHOI из озера Мерсер был получен самый длинный (1,76 м) керн осадочных пород, когда-либо добытый из подледниковых озер. Данный проект можно считать одним из наиболее ценных с точки зрения полученного опыта в области техники и технологии исследования подледниковых озер.

Основными отличительными особенностями рассмотренных проектов являются: использование технологии бурения скважины доступа к озеру горячей водой; использование пробоотборников, не имеющих возможности перемещения по донной поверхности озера.

Анализ предлагаемой технологии. Опыт зарубежных исследователей учитывается при создании техники и технологий отбора проб донной поверхности подледникового озера Восток; не все технические решения, используемые в рассматриваемых проектах, могут быть применимы на озере Восток ввиду его уникальных характеристик (глубина, мощность ледника и т.д.) [5].

Технологии, предложенные сотрудниками Горного университета, в большей степени подходят для характеристик озера Восток, однако и они требуют анализа, обсуждения и доработки. Предлагаемый нами вариант технологии отбора проб донной поверхности подледникового озера Восток (рис.2) базируется на перспективе создания современного бурового комплекса в районе строящегося нового зимовочного комплекса станции «Восток» с бурением новой скважины доступа к озеру электромеханическими и тепловыми снарядами.

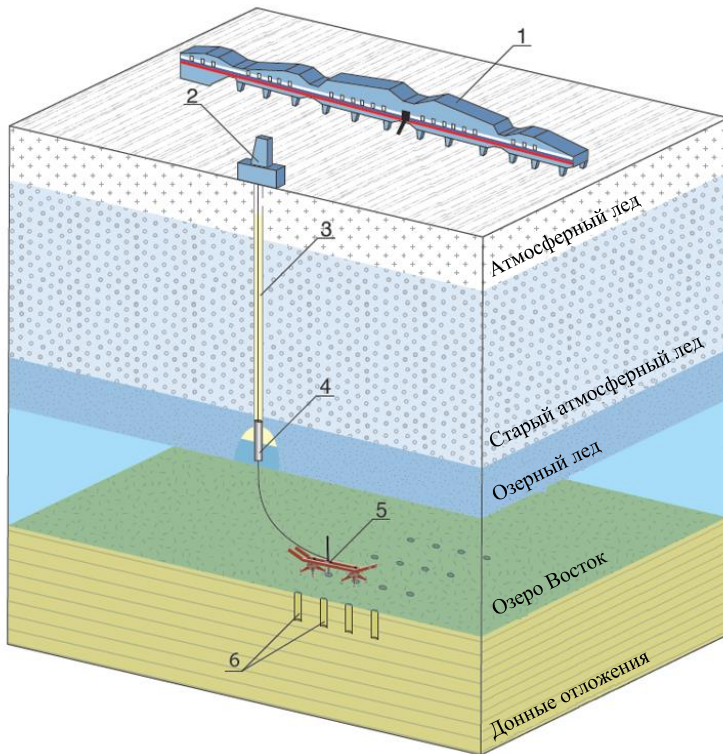


Рис.2. Технология отбора проб донной поверхности подледникового озера Восток

- 1 – новая станция «Восток»; 2 – новый буровой комплекс; 3 – скважина доступа, заполненная экологически безопасной заливочной жидкостью;
- 4 – доставочный снаряд; 5 – научно-исследовательский модуль;
- 6 – сетка скважин

Через скважину доступа с использованием доставочного снаряда на дно озера будет опущен научно-исследовательский модуль. В данной технологии в качестве научно-исследовательского модуля рассматривается шагающее устройство, которое может быть оснащено буровой установкой или другим видом пробоотборника [28, 29]. Отличительной особенностью устройства является возможность перемещения по донной поверхности озера, что существенно расширяет зону исследовательских работ. Например, можно выполнить работы по бурению сетки скважин. При необходимости на универсальной шагающей установке может быть смонтировано любое оборудование для исследования донной поверхности.

В качестве заливочной жидкости при бурении скважины доступа планируется использовать низкомолекулярные силиконовые масла, возможность применения которых впервые рассматривались в проекте бурения на куполе F [18]. Они обладают всеми необходимыми для буровой жидкости

характеристиками, в первую очередь высокой экологической безопасностью, но для окончательного принятия решения об их использовании необходимо проведение дополнительных исследований, в том числе и пробного бурения [20, 31, 38].

При подготовке новой скважины к вскрытию озера Восток будет использована ранее предложенная технология с подъемом озерной воды в расширенную нижнюю часть скважины [1], основные этапы которой представлены на рис.3.

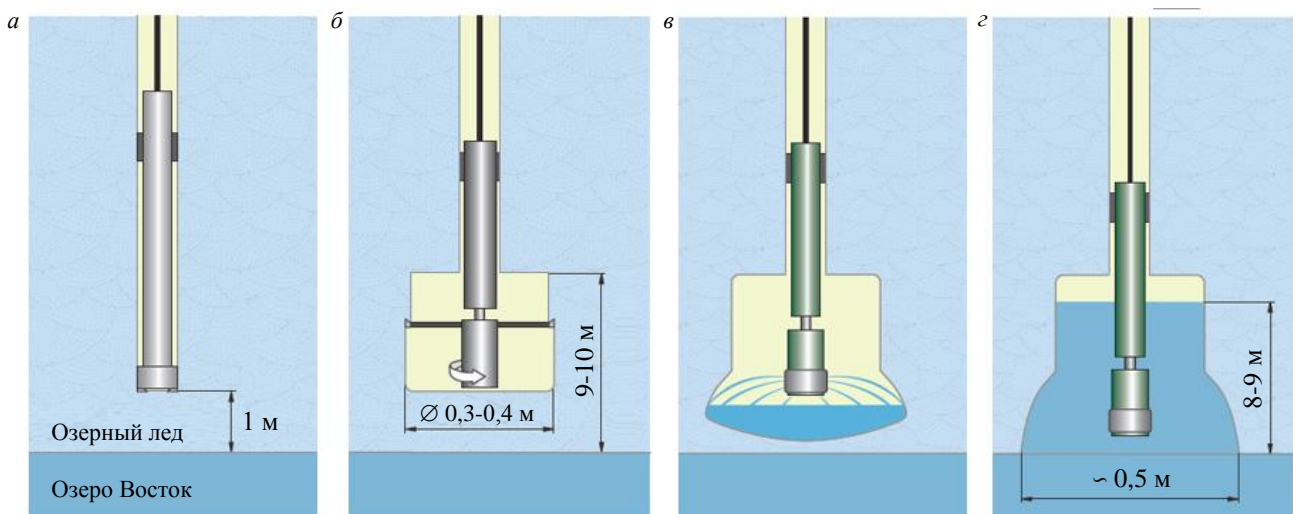


Рис.3. Технология вскрытия подледникового озера Восток:

- а – завершение проходки скважины колонковым электромеханическим снарядом; б – местное увеличение диаметра скважины механическим расширителем; в – создание каверны тепловым расширителем; г – вскрытие подледникового озера



Первый этап заключается в проходке скважины колонковым электромеханическим снарядом с остановкой бурения за 1-2 м до подледникового озера (рис.3, а), второй этап предполагает местное увеличение диаметра скважины механическим расширителем на высоту 8-9 м от забоя (рис.3,б). Следующие этапы предполагают использование теплового расширителя, посредством которого на третьем этапе будет создана каверна (рис.3, в), а на четвертом вскрыто подледниковое озеро (рис.3, г).

В подготовленную к проникновению скважину опускается доставочный снаряд с научно-исследовательским модулем. В качестве научно-исследовательского модуля могут использоваться различные устройства для отбора проб воды, грунта, съемки донной поверхности и т.д. В данной работе будет рассмотрено шагающее устройство.

Шагающее устройство размещается в доставочном снаряде (рис.4), который состоит из отсека привода лебедки и отсека с научно-исследовательским оборудованием. В отсеке привода лебедки размещены двигатель, муфта, редуктор и магнитная муфта, которая передает вращающий момент на вал лебедки. Отсек с научно-исследовательским оборудованием для обеспечения экологической безопасности проводимых работ заполнен дистиллированной водой и закрыт герметичными шторками. Доставочный снаряд опускается в подготовленную каверну на грузонесущем кабеле, распорное устройство предотвращает вращение снаряда. Герметичные шторки открываются и шагающее устройство переводится из транспортного положения в рабочее, спускаясь к донной поверхности на собственном грузонесущем кабеле, с помощью которого будет происходить управление устройством.

Принципиальная конструкция шагающего устройства представлена на рис.5. Шагающее устройство состоит из рамы, выполненной из полых труб, внутри которых перемещаются противовесы. К раме шарнирно крепятся две поворотные платформы. Противовесы и поворотные платформы необходимы для обеспечения процесса перемещения шагающего устройства по донной поверхности. На трубах установлены направляющие, относительно которых перемещается каретка, снабженная буровой установкой.

Движение шагающего устройства (на рис.6 грузонесущий кабель, связывающий устройство с доставочным снарядом, не указан) происходит следующим образом: устройство располагается

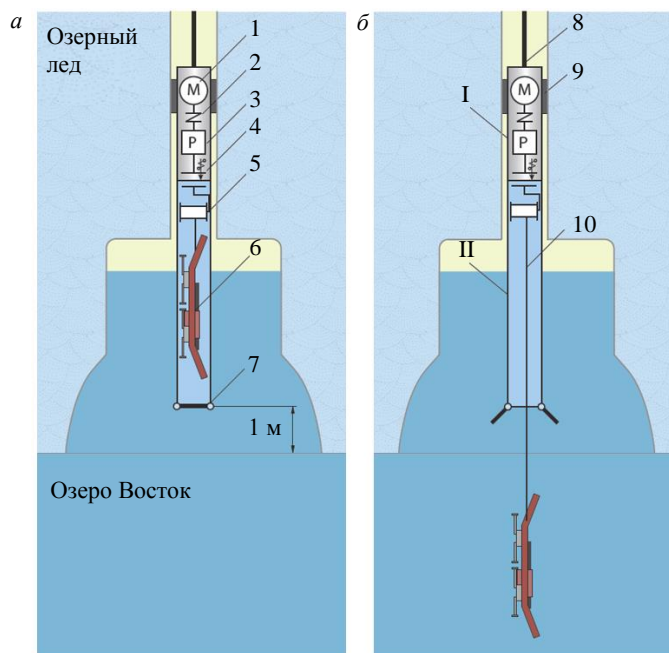


Рис.4. Доставочный снаряд с шагающим устройством:

а – транспортное положение;

б – начало перехода в рабочее положение

I – герметичный отсек привода лебедки; II – герметичный отсек с научно-исследовательским оборудованием; 1 – двигатель; 2 – муфта; 3 – редуктор; 4 – магнитная муфта; 5 – лебедка; 6 – шагающая установка; 7 – герметичные шторки; 8 – грузонесущий кабель доставочного снаряда; 9 – распорное устройство; 10 – грузонесущий кабель шагающей установки

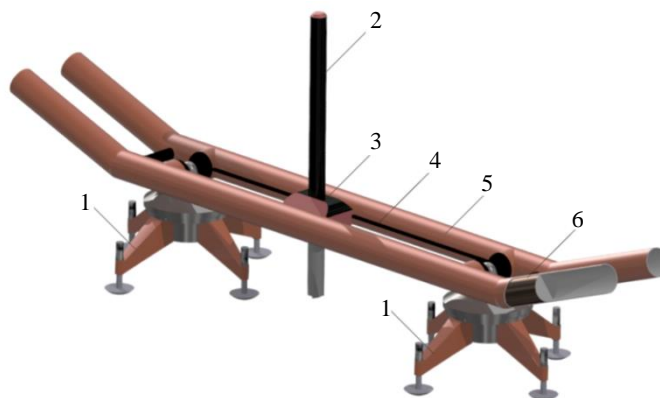


Рис.5. Принципиальная конструкция шагающего устройства

1 – поворотные опоры; 2 – буровая установка; 3 – каретка; 4 – направляющие; 5 – рама; 6 – противовес

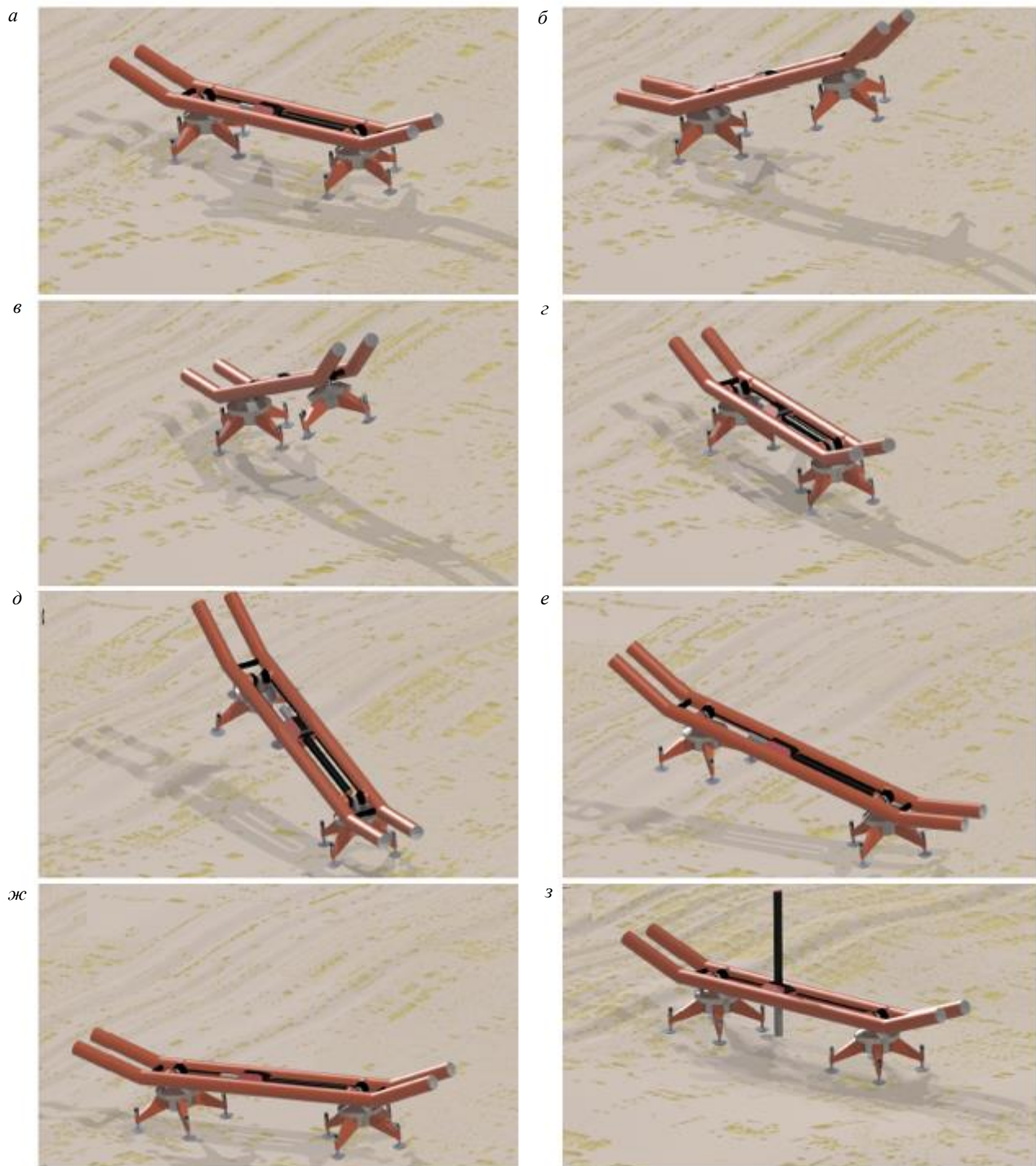


Рис.6. Последовательность движения шагающего устройства по донной поверхности озера:

а – начальное положение шагающего устройства на донной поверхности; *б* – поднятие первой опоры за счет смещения противовесов; *в* – поворот относительно второй опоры; *г* – опускание первой опоры за счет смещения противовесов; *д* – поднятие второй опоры за счет смещения противовесов; *е* – поворот относительно первой опоры; *ж* – опускание второй опоры за счет смещения противовесов; *з* – перевод буровой установки в рабочее положение

на донной поверхности (рис.6, *а*); поднимается одна из шарнирных опор за счет изменения положения центра масс путем перемещения противовесов внутри полых труб (рис.6, *б*); устройство поворачивается на заданный угол относительно опоры, находящейся на донной поверхности (рис.6, *в*); противовесы перемещаются внутри полых труб, центр тяжести устройства смещается и оно встает снова на две опоры (рис.6, *г*).



Затем цикл шагания повторяется относительно другой поворотной платформы (рис.6, д, е, ж), и так происходит до тех пор, пока устройство не переместится в соответствии с заданным планом исследовательских работ в точку с заданной координатой. В точке с заданной координатой буровая установка переводится в рабочее положение (рис.6, з) и происходит отбор керна, затем шагающее устройство поднимается на грузонесущем кабеле к доставочному снаряду, переводится в транспортное положение и поднимается в доставочном снаряде на поверхность.

Рассмотренное шагающее устройство является универсальной транспортной платформой, на которой можно разместить различные виды научно-исследовательского оборудования. Например, буровой снаряд для отбора керна (как показано на рис.5 и 6), геофизическое оборудование для изучения донной поверхности, пробоотборники для отбора проб воды и донных осадков и многое другое.

Шагающее устройство предполагается оснастить средствами телеметрии, которые позволят управлять процессами перемещения и выполнения научно-исследовательских работ дистанционно. Электроснабжение приводов шагающего устройства и научно-исследовательского оборудования, а также передача информации и управляющих сигналов будут осуществляться через грузонесущий кабель. При проектировании пробоотборного оборудования будут учтены результаты предыдущих лабораторных и полевых работ российских [41] и зарубежных [10, 31] ученых.

Технологические параметры шагающего устройства и научно-исследовательского оборудования будут зависеть от размеров доставочного снаряда, которые ограничиваются диаметром скважины доступа. Конкретные значения технологических параметров будут представлены в последующих публикациях, основанных на результатах планируемых исследований.

Однако уже сейчас можно констатировать, что планируемые научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы будут направлены на создание конструкции, обеспечивающей необходимую «чистоту» отбираемых образцов материала, объем единичной пробы и необходимое количество проб с заданной площадки исследования.

Достигнутые результаты и планируемые исследования. В соответствии с предложенной технологией отбора проб донной поверхности подледникового озера Восток (см. рис.3) были разработаны принципиальная схема доставочного снаряда (см. рис.4) и конструкция шагающего устройства (см. рис.5). Смоделирован процесс перемещения шагающего устройства по донной поверхности.

Определен ряд задач, которые необходимо решить в рамках реализации данной технологии:

- обеспечить экологическую безопасность на всех этапах работы шагающего устройства;
- обеспечить работоспособность всех узлов и деталей шагающего устройства;
- разместить шагающее устройство при транспортном положении в доставочном снаряде, диаметр которого будет равен диаметру используемых колонковых труб при бурении;
- обеспечить надежность перевода шагающего устройства из транспортного положения в рабочее и обратно;
- обеспечить контроль позиционирования шагающего устройства на донной поверхности;
- разработать различные виды оборудования для отбора проб и исследования донной поверхности;
- обеспечить максимальную эффективность применения оборудования для отбора проб при различных условиях эксплуатации.

Для решения этих задач планируется провести кинематические, динамические и прочностные расчеты, выполнить твердотельное моделирование всех этапов работы, создать действующую модель шагающего устройства и провести стендовые испытания.

Выводы. На основании проведенного анализа реализованных проектов по исследованию подледниковых водоемов можно сделать следующие выводы:

1. Для проведения работ по вскрытию и исследованию подледникового озера Восток необходимо создание на действующей станции новой инфраструктуры, обеспечивающей возможность решения поставленных задач, – зимовочного и бурового комплексов.

2. Известные технологии вскрытия и исследования подледниковых водоемов не могут быть адаптированы к применению на озере Восток ввиду его уникальных характеристик (экстремально



низкая температура верхних слоев ледника, мощность ледника, глубина озера и т.д.) и высокогорных условий станции «Восток», но отдельные их элементы могут быть учтены при разработке новых технологий.

3. Разрабатываемая технология вскрытия и исследования подледникового озера Восток должна в первую очередь обеспечивать экологическую безопасность проводимых работ, а технические средства ее реализации – надежность и безотказность.

Основным достоинством предлагаемой технологии по сравнению с рассмотренными является большая мобильность шагающего устройства, позволяющая произвести селективный отбор проб пород с определенной площади донной поверхности, используя при этом только одну скважину доступа. Кроме того, возможность оснащения шагающего устройства различными типами проботорборников, а также разнообразной научно-исследовательской аппаратуры позволяет повысить инвариантность и эффективность исследования подледникового озера Восток. Для реализации данной технологии необходимо решить большой ряд задач научно-практического и проектно-конструкторского характера.

ЛИТЕРАТУРА

1. Васильев Н.И. Перспективы получения образцов донных отложений подледникового озера Восток / Н.И.Васильев, Г.Л.Лейченко, Э.А.Загривный // Записки Горного института. 2017. Т. 224. С. 199-208. DOI: 10.18454/PMI.2017.2.199
2. Геологическая природа подледникового озера Восток в Восточной Антарктиде / Г.Л.Лейченко, Б.В.Беляцкий, А.М.Попков, С.В.Попков // Материалы гляциологических исследований. 2005. № 98. С. 81-91.
3. Литвиненко В.С. Уникальные техника и технологии бурения скважин во льдах Антарктиды // Записки Горного института. 2014. Т. 210. С. 5-10.
4. Лукин В.В. Путь к изучению вод озера Восток // Проблемы Арктики и Антарктики. 2012. № 1(91). С. 5-19.
5. Попов С.В. Подледниковое озеро Восток, Восточная Антарктида: береговая линия и окружающие водоемы / С.В.Попов, У.Б.Черноглазов // Лед и Снег. 2011. № 1 (113). С. 13-24.
6. Попов С.В. Озеро Восток, Восточная Антарктида: мощность ледника, глубина озера, подледный и коренной рельеф / С.В.Попов, В.Н.Масолов, В.В.Лукин // Лед и Снег. 2011. № 1 (113). С. 25-35.
7. Рельеф дна и водное тело подледникового озера Восток, Восточная Антарктида / В.Н.Масолов, С.В.Попов, В.В.Лукин, А.М.Попков // Доклады Академии наук. 2010. Т. 433. № 5. С. 693-698.
8. Эволюция климата, оледенения и подледниковой среды Антарктиды по данным исследований ледяных кернов и проб воды озера Восток (Основные итоги работ по проекту РФФ, 2014-2016 гг.) / В.Я.Липенков, А.А.Екайкин, И.А.Алехина // Лед и Снег. 2017. Т. 57. № 1. С. 133-141. DOI: 10.15356/2076-6734-2017-1-133-141
9. A large deep freshwater lake beneath the ice of central East Antarctica / A.P.Kapitsa, J.K.Ridley, G. de Q.Robin et al. // Nature. 1996. Vol. 381. P. 68-686. DOI: 10.1038/381684a0
10. A low resource subglacial bedrock sampler: The percussive rapid access isotope drill (P-RAID) / R.Timoney, K.Worrall, D.Firstbrook et al. // Cold Regions Science and Technology. 2020. Vol. 177. №103113. DOI: 10.1016/j.coldregions.2020.103113
11. An assessment of deep hot-water drilling as a means to undertake direct measurement and sampling of Antarctic subglacial lakes: Experience and lessons learned from the Lake Ellsworth field season 2012/13 / M.Siegert, K.Makinson, D.Blake et al. // Annals of Glaciology. 2014. Vol. 55. Iss. 65. P. 59-73. DOI: 10.3189/2014AoG65A008
12. Antarctic subglacial lake exploration: First results and future plans / M.Siegert, J.Priscu, I.Alekhnina et al. // Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 2016. Vol. 374. Iss. 2059. № 0466. DOI: 10.1098/rsta.2014.0466
13. Blythe D. Developing a hot-water drill system for the WISSARD project: 2. In situ water production / D.Blythe, D.Duling, D.Gibson // Annals of Glaciology. 2014. Vol. 55. Iss. 68. P. 298-302. DOI: 10.3189/2014AoG68A037
14. Construction of the Vostok station living module completed in the Leningrad region. URL: <https://ria.ru/20200827/kompleks-1576399846.html> (дата обращения 1.09.2020).
15. Clean access, measurement, and sampling of Ellsworth Subglacial Lake: A method for exploring deep Antarctic subglacial lake environments / M.Siegert, R.Clarke, M.Mowlem, // Reviews of Geophysics. 2012. Vol. 50. Iss. 1. RG000361. DOI: 10.1029/2011RG000361
16. Developing a hot-water drill system for the WISSARD project: 3. Instrumentation and control systems / J.Burnett, F.Rack, D.Blythe et al. // Annals of Glaciology. 2014. Vol. 55. Iss. 68. P. 303-310. DOI: 10.3189/2014AoG68A039
17. Developing a hot-water drill system for the WISSARD project: 1. Basic drill system components and design / F.Rack, D.Duling, D.Blythe et al. // Annals of Glaciology. 2014. Vol. 55. Iss. 68. P. 285-297. DOI: 10.3189/2014AoG68A031
18. Drilling fluid for Dome F Project in Antarctica / S.Fujita, T.Yamada, R.Naruse, S.Mae, N.Azuma, Y.Fujii et al. // Memoirs of National Institute of Polar Research. 1994. Special iss. 49. P. 347-357.
19. Dvoynikov M.V. Developments Made in the Field of Drilling Fluids by Saint Petersburg Mining University / M.V.Dvoynikov, M.V.Nutskova, P.A.Blinov // International Journal of Engineering. 2020. Vol. 33. Iss. 4. P. 702-711. DOI: 10.5829/ije.2020.33.04a.22
20. Environmental considerations of low-temperature drilling fluids / P.Talalay, Z.Hu, H.Xu et al. // Annals of Glaciology. 2014. Vol. 55. Iss. 65. P. 31-40. DOI: 10.3189/2014AoG65A226
21. Geology and environments of subglacial Lake Vostok / G.L.Leitchenkov, A.V.Antonov, P.I.Luneov, V.Ya.Lipenkov // Philosophical Transactions of the Royal Society A. 2016. Vol. 374. Iss. 2059. № 0302. DOI: 10.1098/rsta.2014.0302



22. High geothermal heat flux measured below the West Antarctic Ice Sheet / A.Fisher, K.Mankoff, S.Tulaczyk et al. // *Science Advances*. 2015. Vol. 1. Iss. 6. № e1500093-e1500093. DOI: 10.1126/sciadv.1500093
23. Litvinenko V.S. Anticipated sub-bottom geology of Lake Vostok and technological approaches considered for sampling / V.S.Litvinenko, G.L.Leitchenkov, N.I.Vasiliev // *Geochemistry*. 2020. Vol. 80. Iss. 3. № 125556. DOI: 10.1016/j.chemer.2019.125556
24. Litvinenko V. Elaboration of a conceptual solution for the development of the Arctic shelf from seasonally flooded coastal areas / V.S.Litvinenko, M.V.Dvoynikov, V.L.Trushko // *International Journal of Mining Science and Technology* (in press). DOI: 10.1016/j.ijmst.2021.09.10
25. Litvinenko V. Foreword: Sixty-year Russian history of Antarctic sub-glacial lake exploration and Arctic natural resource development // *Geochemistry*. 2020. Vol. 80. Iss. 3. № 125652. DOI: 10.1016/j.chemer.2020.125652
26. Location for direct access to Subglacial Lake Ellsworth: An assessment of geophysical data and modeling / J.Woodward, A.Smith, N.Ross // *Geophysical Research Letters*. 2010. Vol. 37. Iss. 11. № L11501. DOI: 10.1029/2010GL042884
27. Mikhalsky E.V. First data on U-Pb age of mafic dyke in the Mirny Station area (Pravdy Coast, East Antarctica) / E.V.Mikhalsky, S.G.Skublov // *Geochemistry*. 2020. Vol. 80. Iss. 3. № 125480. DOI: 10.1016/j.chemer.2018.10.001
28. Patent № 2601880. Walking machine for underwater mining / I.P.Timofeev, G.V.Sokolova, G.A.Kolton et al. Viewed: 10.11.2016.
29. Patent №166446. Walking mining machine / I.P.Timofeev, G.V.Sokolova, I.A.Korolev et al. Viewed: 27.11.2016.
30. Physical processes in Subglacial Lake Whillans, West Antarctica: Inferences from sediment cores / T.Hodson, R.Powell, S.A.Brachfeld et al. // *Earth and Planetary Science Letters*. 2016. Vol. 444. P.56-63. DOI: 10.1016/j.epsl.2016.03.036
31. Physicochemical properties of potential low-temperature drilling fluids for deep ice core drilling / N.Liu, H.Xu, Y.Yang et al. // *Cold Regions Science and Technology*. 2016. Vol. 129. P. 45-50. DOI: 10.1016/j.coldregions.2016.06.004
32. Refined geological history of the polyphase plutonometamorphic complex in the Thala Hills area (Enderby Land, East Antarctica) from zircon SHRIMP dating and implications for Neoproterozoic amalgamation of Gondwanaland / E.V.Mikhalsky, D.Krylov, N.Rodionov et al. // *Geological Society*. 2017. Vol. 457. P. 7-36. DOI: 10.1144/sp457.2
33. Scientific access into Mercer Subglacial Lake: Scientific objectives, drilling operations and initial observations / J.Priscu, J.Kalin, J.Winans et al. // *Annals of Glaciology*. 2021. Vol. 62. Iss. 85-86. P. 340-352. DOI:10.1017/aog.2021.10
34. Siple Coast Subglacial Aquatic Environments: The Whillans Ice Stream Subglacial Access Research Drilling Project / H.Fricker, R.Powell, J.Priscu et al. // *Antarctic Subglacial Aquatic Environments* (Geophysical Monograph Series). American Geophysical Union, 2011. Vol. 192. P. 199-219. DOI: 10.1002/9781118670354.ch12
35. Siegert M. Proposed Exploration of Subglacial Lake Ellsworth. Antarctica Final Comprehensive Environmental Evaluation. British Antarctic Survey. Technical report. Lake Ellsworth Antarctica, 2012. 87 p.
36. Talalay P. Subglacial till and bedrock drilling // *Cold Regions Science and Technology*. 2013. Vol. 86. P. 142-166. DOI: 10.1016/j.coldregions.2012.08.009
37. Technologies for retrieving sediment cores in Antarctic subglacial settings / D.Hodgson, M.Bentley, J.Smith et al. // *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2016. Vol. 374. Iss. 2059. № 20150056. DOI:10.1098/rsta.2015.0056
38. Triest J. Drill fluid selection for the SUBGLACIOR probe: A review of silicone oil as a drill fluid / J.Triest, O.Aleman // *Annals of Glaciology*. 2014. Vol. 55. Iss. 68. P. 311-321. DOI: 10.3189/2014AoG68A028
39. WISSARD at Subglacial Lake Whillans, West Antarctica: Scientific operations and initial observations / S.Tulaczyk, J.Mikucki, M.Siegfried et al. // *Annals of Glaciology*. 2014. Vol. 55. Iss. 65. P. 51-58. DOI: 10.3189/2014AoG65A009
40. WISSARD About. URL: <http://www.wissard.org/about> (дата обращения 21.07.2020).
41. Vasilev N.I. Inertial mechanical reamer for borehole 5G-3 conditioning for penetration into subglacial lake Vostok / N.I.Vasilev, A.V.Bolshunov, S.A.Ignatiev // *International Journal of Applied Engineering Research*. 2017. Vol. 11. № 5. С. 561-566.

Авторы: А.В.Большунов, канд. тех. наук, научный руководитель научного направления НЦ «Арктика», bolshunov_av@pers.spmi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3879-7380> (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия), Н.И.Васильев, д-р тех. наук, профессор, <https://orcid.org/0000-0002-2279-699X> (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия), И.П.Тимофеев, д-р тех. наук, профессор, <https://orcid.org/0000-0002-9572-0542> (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия), С.А.Игнатъев, канд. тех. наук, заведующий кафедрой, <https://orcid.org/0000-0002-5527-0978> (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия), Д.А.Васильев, аспирант (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия), Г.Л.Лейченко, д-р геол.-минерал. наук, заместитель генерального директора, <https://orcid.org/0000-0001-6316-8511> (ВНИИОкеангеология, Санкт-Петербург, Россия), профессор (Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.