

Крибот для исследования ледяных щитов планет

А.В.Зеленчук¹, В.А.Крыленков¹

¹ООО «Научно-техническая фирма СВИТ» (Москва, Россия)

Технология повышения коэффициента преобразования тепловой энергии крибота в энергию плавления льда под давлением гидравлической силы, генерируемой самим криботом, позволяет безопасно увеличить мощность термоголовки и скорость термического бурения льда. Используя однопроводную систему Тесла для электропитания крибота, можно уменьшить габариты катушки с кабелем в корпусе крибота и снизить потери энергии. Благодаря гидравлической силе (тяги) крибот будет самостоятельно подниматься на поверхность льда без нагрузки на кабель. Реализация разработанных схем и конструкций ТГБ (термических, гидравлических, буровых) криботов даст возможность организовать системные исследования ледников и подледниковых сред на Земле (на глубинах до 5 км) и на других планетах (в частности, на Европе, спутнике Юпитера, которую покрывает лед толщиной до 30 км), не нарушая их ледяной изоляции, с многократной экономией средств, энергии и времени.

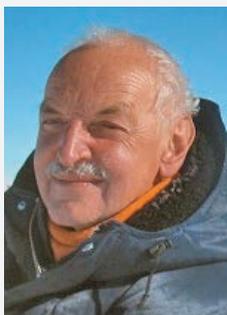
Ключевые слова: термобур-зонд, гидравлическая сила, однопроводная система Тесла, ТГБ-крибот, исследования льдов на Земле и Европе — спутнике Юпитера.

Изучение ледяных щитов, подледниковых водных сред и осадочных отложений Антарктики и Арктики, их микробной жизни в экстремальных условиях, хронологических горизонтах, содержащих геологическую летопись о палеоклиматических изменениях за многие тысячи и миллионы лет, позволяет расшифровать уникальную информацию об эволюции Земли и жизни на ней. Эти знания необходимы для предсказания текущих изменений климата, прогноза природных катастроф, чтобы обезопасить людей от негативных последствий быстрого изменения климата и среды обитания на Земле. Инструментом подобных исследований могут служить специальные буровые комплексы, криботы, зонды, способные проникать в соответствующие среды на значительную глубину, отбирать пробы этих сред и не вносить туда загрязнения с поверхности.

Сходные условия, как полагают ученые, существуют в ледяных покровах и подледных океанах спутников Юпитера (Ганимеда, Каллисто и Европы) и Сатурна (Дионы и Энцелада), на полюсах Марса. Создание и применение зондов для экологи-



Анатолий Владимирович Зеленчук, кандидат технических наук, генеральный директор ООО «Научно-техническая фирма СВИТ». Область научных интересов — новые методы внутриреакторного материаловедения и неразрушающего контроля теплоделяющих элементов реакторов, инновационные технологии в медицине, океанологии, гидрологии, гляциологии для изучения Антарктики и Арктики. Участник 56-й Российской антарктической экспедиции.



Вячеслав Александрович Крыленков, доктор биологических наук, сотрудничает с той же фирмой, научный руководитель группы мониторинга полярных регионов. Специалист в области биофизики, молекулярной биологии, инновационных технологий в медицине, океанологии, гидрологии, гляциологии. Участник арктических и антарктических экспедиций.

чески безопасных исследований антарктического озера Восток, покрытого льдом толщиной до 4 км и изолированного от окружающей среды в течение 15 млн лет (рис.1), позволит астробиологам уже на Земле многое узнать о потенциальной жизни в холодных мирах Солнечной системы. Перед отправкой таких зондов, например, на ту же Европу, где

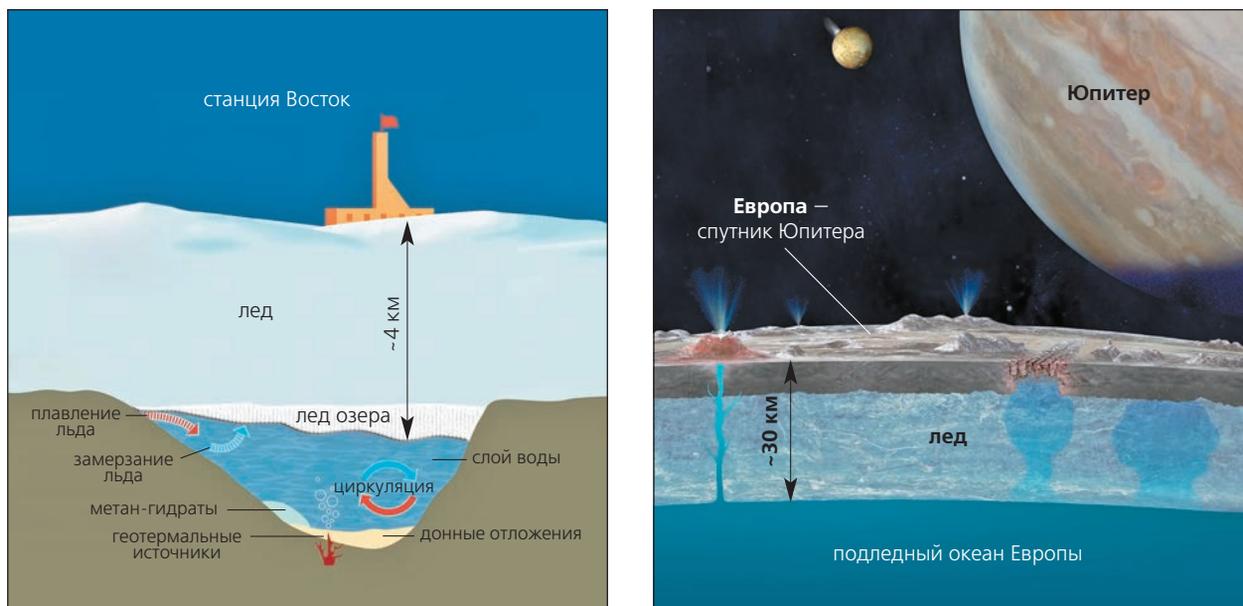


Рис.1. Примерный вид разреза толстых льдов и подледниковых сред на Земле и на спутнике Юпитера Европе. Рисунок НАСА.

толщина льда достигает 30 км, а глубина подледного океана до 100 км, необходимы их предварительные испытания на внутриконтинентальной российской антарктической станции Восток, которая расположена на ледяном щите толщиной приблизительно в 4 км над одноименным озером.

Изучать без нарушения экологии

Ученые надеются обнаружить следы жизни в озере Восток, но опасаются, что негерметичный доступ в подледниковое озеро через открытые скважины во льду увеличит опасность заноса микробов с поверхности или из пройденного ледового слоя, нарушит режимы термобарического равновесия и фазового перехода на всей поверхности раздела лед—вода, что может изменить экологию реликтового озера. По данным Российской академии наук, в Антарктиде существует более 350 подледниковых озер с экстремальными условиями обитания микроорганизмов. В каждом из них свои режимы термобарического равновесия и фазового перехода на поверхности раздела лед—вода, в каждом озере могут обитать неизвестные микроорганизмы, а в донных осадках может содержаться ценная информация об истории климатических изменений и палеоэкосистемах.

Требования экологически чистого доступа к подледниковым средам сопряжены со значительными инженерными и материально-техническими проблемами. Например, скважины во льду глубиной более 500 м, пробуренные в Антарктиде колонковыми бурами для извлечения на поверхность проб в виде кернов льда, необходимо заполнять незамерзающей жидкостью для предотвращения деформации стенок скважины под действием горного давления льда. Буровая токсичная жидкость влияет на чистоту проб, извлекаемых с глубин и может попасть в водную среду при проникновении в озеро или частично смешаться с водой озера в скважине,



Озеро Восток в Антарктиде (глубина — >1200 м, длина — 250 км, ширина — 50 км).

в зависимости от перепада давления на границе раздела лед—вода. Вес этого крупногабаритного бурового оборудования обычно составляет до нескольких сотен тонн, а транспорт и обслуживание требуют более десятка специалистов. Тем не менее за 20 лет из сверхглубокой скважины на станции Восток с помощью колонковых буров добыты тысячи кернов льда, изучение которых дало уникальную информацию о палеоклиматических изменениях на Земле за сотни тысяч лет.

Другая возможность обустроить скважину во льду — не сверлить лед, а направленно проплавлять его толщу горячей водой (Clean Hot Water Drills, CHWD) — дает большую скорость проходки, но неэффективно из-за больших потерь тепла. Кроме того, такая открытая скважина доступна для изучения подледной среды различными приборами не более 24 ч, пока она не замерзнет, что является недостатком CHWD-технологии [1].

Применять в труднодоступных полярных регионах Земли громоздкие буровые установки с колонковыми бурами и комплексы с горячей водой (вес которых исчисляется сотнями тонн, а энергетические затраты превышают 5 МВт) для системных исследований льдов и подледниковых сред чрезвычайно дорого, нерационально и опасно для экосистем изолированных озер. Для таких работ нужны мобильные автономные зонды, которые позволяют герметично проникать в подледниковые среды и к тому же способны в десятки раз дешевле, быстрее и точнее определять наиболее интересные места для дальнейших детальных исследований льдов, поиска или разработки полезных месторождений на Земле, а в будущем — на других планетах.

Одно из перспективных решений для земных условий — зонд RECAS (Recoverable autonomous sonde — извлекаемый автономный зонд) на основе термического бурения [2] (рис.2,а). Он оснащен двумя термоголовками на торцах корпуса, внутри которого размещены приборный отсек и катушка с несущим кабелем (кабель соединен с элек-

трогенератором и пультом управления на поверхности льда). По мнению разработчиков, такой зонд позволит отбирать пробы талой воды из льда и водной среды озера, проводить их анализ, оставаясь изолированным от поверхности льда.

Работает RECAS следующим образом: когда нижняя термоголовка плавит лед, зонд движется вниз под действием собственной силы тяжести, а несущий кабель выходит через небольшое центральное отверстие в верхней термоголовке. Талая

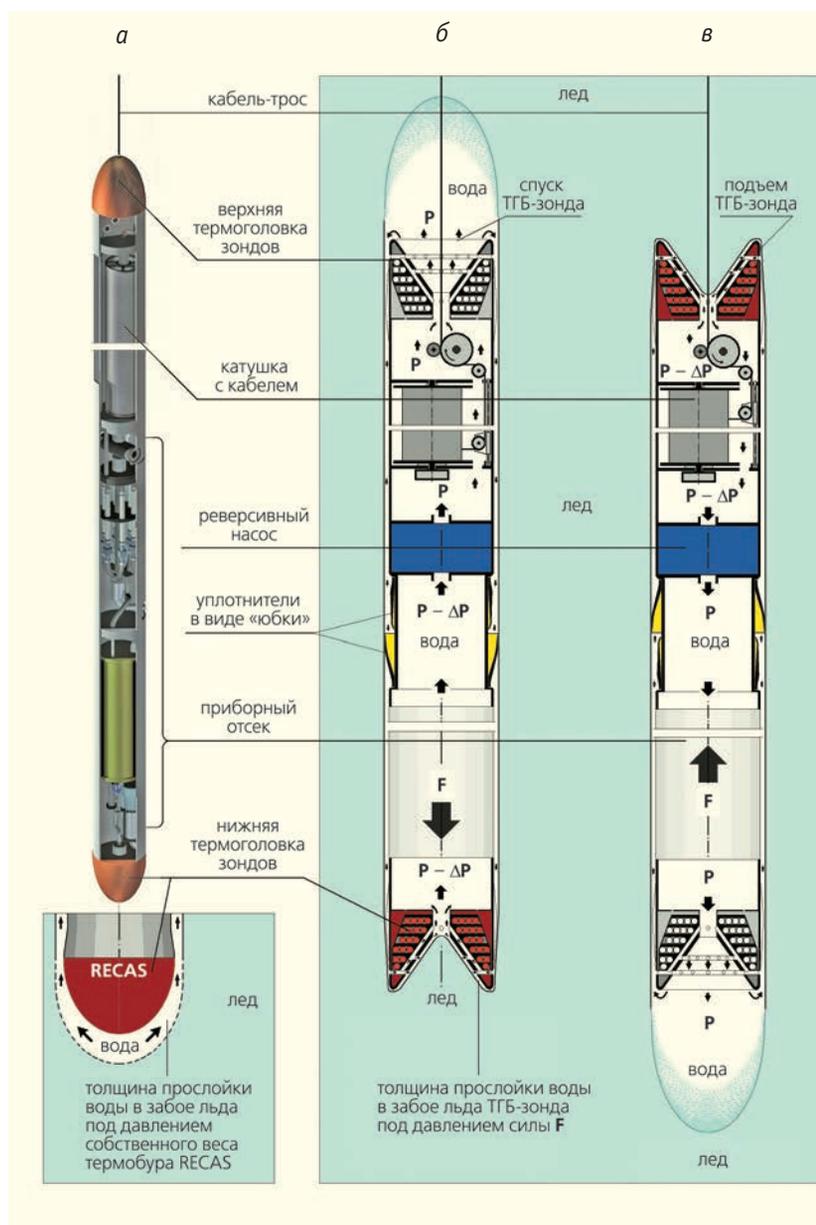


Рис.2. Эскизные проекты термобуров-зондов для исследования толстых льдов и подледниковых озер без нарушения их ледяной изоляции: термобур RECAS, плавящий лед под давлением собственного веса (показан фрагмент водяной прослойки между льдом и термоголовкой RECAS (а)); ТГБ-зонд при спуске в толщу льда под давлением гидравлической силы F (б); бурение ТГБ-зондом льда вверх под воздействием подъемной силы F (в).

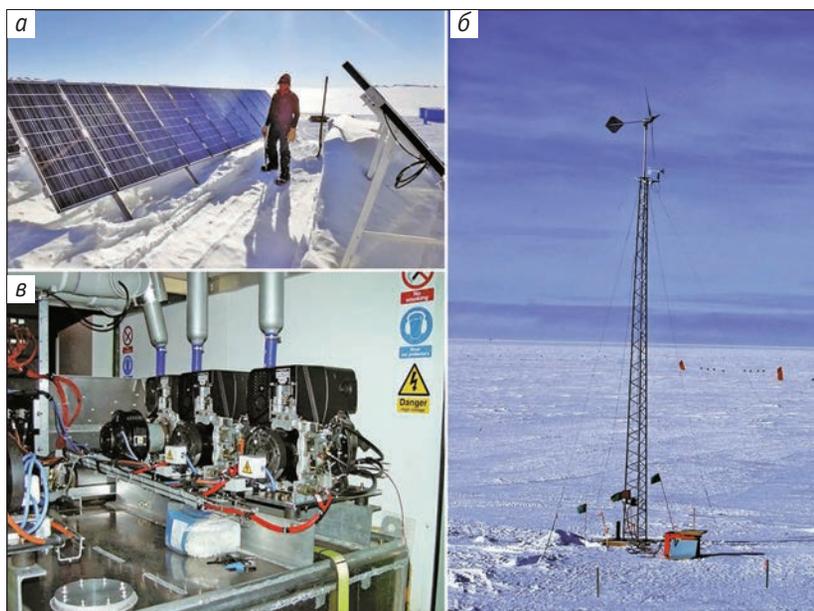
вода в скважине выше зонда быстро замерзает, охватывая неподвижный кабель и обеспечивая тем самым ледяную изоляцию зонда и подледниковой среды от поверхности ледника. Можно сказать, что устройство движется сквозь лед внутри герметичного подвижного кокона, заполненного талой водой. Для подъема зонда несущий кабель с усилием, создаваемым электромеханическим приводом, наматывают на катушку, размещенную в корпусе зонда, а верхняя термоголовка при этом плавит лед. Сила давления зонда на ледяную забой определяется силой натяжения кабеля. Талая вода в скважине ниже зонда быстро замерзает, что обеспечивает ледяную изоляцию подледниковой среды от поверхности льда.

Разработчики термобура утверждают, что RECAS диаметром 150 мм и длиной 4 м, оснащенный электрогенератором мощностью 9–10 кВт, способен развить скорость проходки льда до 1.7 м/ч. По их оценкам, цикл исследований льда на глубинах до 5 км потребует 8–9 мес, не менее 12 т топлива и штат из четырех или пяти специалистов для его обслуживания, что в 10–20 раз дешевле, чем применение электромеханического бурения или бурения горячей водой.

По нашему мнению, при всех достоинствах использование RECAS все же нуждается в длительном времени и большом запасе топлива, что не позволит провести полный цикл исследования в период сезонных работ в Арктике и Антарктике (за 2–3 мес). Кроме того, большая механическая нагрузка на несущий кабель при подъеме RECAS может привести к его обрыву и потере зонда.

Этот же принцип конструирования зонда был заложен специалистами из США, которые на средства НАСА (Национального управления по аэронавтике и исследованию космического пространства) создают криобот VALKYRIE (Very Deep Autonomous Laser-powered Kilowatt-class Yo-yoing Robotic Ice Explorer, «Валькирия»), который предназначен для исследования толстого (до 30 км) льда и подледного океана (с глубинами до 100 км) на спутнике Юпитера Европе [3]. При испытаниях на Аляске макет такого криобота мощностью 5 кВт пробурил лед на глубину в 30 м при скорости проходки примерно в 1 м/ч.

Главным недостатком термобуров типа RECAS и криобота VALKYRIE, проплавляющих толщу льда под давлением собственного веса, остается малая скорость бурения из-за большого термического сопротивления водяной прослойки в забое



Возможные источники электрического питания RECAS в Антарктиде: солнечные панели (как на базовом лагере вблизи залива Кроун, а); ветровой турбогенератор (модель турбины Raum, б); автоматические дизель-генераторы (система питания PLATO, в).

между льдом и термоголовкой, пропорциональной толщине этой прослойки (см. рис.2,а, внизу). Если же для ускорения проходки просто повысить мощность термоголовки, это может привести к парообразованию и увеличению толщины водной прослойки. В результате теплоотдача в ледяную забой снизится, и нагреватель может перегореть. Поэтому для безопасного увеличения мощности термоголовки и скорости бурения необходимо увеличить теплоотдачу нагревателя в лед через прослойку талой воды.

Дополнительная сила для термобура

С целью безопасного увеличения мощности термоголовки (и скорости движения) термобура предлагается снизить термическое сопротивление прослойки воды в забое, уменьшая ее толщину путем воздействия дополнительной силой на термобур. На больших глубинах, недостижимых для прямого воздействия на термобур с поверхности льда, на него воздействовать может гидравлическая сила, создаваемая самим термобуром за счет перепада давления воды на концах термобура-зонда, как показано на рис.2,б [4, 5].

Наш эскизный проект термического гидравлического бурового зонда (ТГБ-зонда) для исследования толстых льдов и подледниковых водных сред представлен на рис.2,б и 2,в. На верхнем и нижнем торцах трубчатого корпуса устройства установлены термоголовки в виде воронок с каналами, предназначенными для перекачки талой воды сквозь

зонд. В отличие от обычно используемых параболических термоголовок, воронкообразные удобны для откачивания талой воды из ледяного забоя через зонд, причем такая их форма фокусирует тепловое излучение в центре ледяного забоя и уменьшает потери тепла через боковые поверхности скважины. Внутри корпуса установлены реверсивные гидронасос и привод катушки с несущим кабелем, который выходит через отверстие в верхней термоголовке за пределы зонда. Над нижней термоголовкой размещен приборный отсек зонда с приводами для взятия проб слоев воды и донного грунта. Чтобы подавать энергию и получать информацию, предусмотрен контактный или бесконтактный токосъем с несущего кабеля. В углублениях по периметру внешнего корпуса ТГБ-зонда установлены пары разнонаправленных уплотнителей в виде «юбок».

Когда зонд движется вниз, включен нагрев нижней термоголовки, а из ледяного забоя талая вода откачивается насосом сквозь зонд, попадая в верхнюю (над корпусом зонда) часть скважины. Благодаря этому в забое создается разрежение, вызывающее обратный ток талой воды через зазор между стенкой скважины и внешним корпусом зонда. Под его действием раскрывается «юбка» уплотнителя, края которой плотно прижимаются к стенкам скважины и перекрывают обратный водяной поток. «Юбка» соседнего уплотнителя, наоборот, складывается и прижимается к корпусу зонда (рис.2,б). В результате создается перепад давления ΔP в поперечном сечении S зонда и сила F , которая давит на ТГБ-зонд, уменьшая прослойку талой воды в ледяном забое, что увеличивает теплоотдачу термоголовки и, соответственно, скорость движения зонда.

Предлагаемый принцип движения зонда во льду (внутри скважины) похож на движение капсулы в трубе пневмопочты за счет перепада давления на концах капсулы. Отличие состоит в том, что сила F возникает за счет понижения давления на ΔP перед зондом путем откачивания насосом талой воды из ледяного забоя. Значение F можно вычислить в соответствии с законом Паскаля, умножив величину перепада давления ΔP , создаваемого насосом, на площадь поперечного сечения зонда S . Например, при величине ΔP в 10 и 20 атм и диаметре зонда 10 см гидравлическая сила F составит около 800 кгс и 1600 кгс соответственно, что превысит собственный вес зонда в 20–100 раз. Сильнее всего F будет давить на ТГБ-зонд в глубинах, где давление воды в скважине P превышает перепад давления ΔP , создаваемый гидронасосом. Пока зонд погружается в лед на глубину нескольких десятков метров, скорость его движения остается соизмеримой со скоростями термобуров, движущихся вниз под воздействием собственного веса. Но на больших глубинах льда, где величина давления талой воды сравнивается или становится больше ΔP насоса, скорость ТГБ-зонда можно повысить в несколько

раз, увеличивая мощности насоса и термоголовки. На глубинах, где давление талой воды 5, 10, 50 и 150 атм, а температура кипения 152, 180, 265 и 350°C соответственно, мощность нагревателя может быть значительно увеличена без риска парообразования. Это обеспечит высокую скорость бурения при наличии дополнительной осевой нагрузки на зонд, повышающей коэффициент преобразования тепловой энергии в энергию плавления льда. Например, при запасе мощности зонда до 20 кВт скорость его движения можно повысить до 30 м/ч на глубинах льда более 200 м.

В момент проникновения зонда в озеро насос (работая в том же режиме) создаст в скважине (но уже выше зонда) локальный перепад давления, который вытеснит зонд в озеро. При этом гидростатическое давление подледниковой воды не изменится, а незначительная часть воды озера, попавшая в верхнюю часть скважины с талой водой, замерзнет и, тем самым, предотвратит нарушение ледяной изоляции подледникового озера.

В воде озера ТГБ-зонд сможет передвигаться вниз или вверх при отключенных термоголовках, но при работающем насосе, который обеспечит направленную гидрореактивную струю на разных концах зонда при реверсе.

При подъеме зонда вверх в воде озера на подходе к границе вода—лед включают верхнюю термоголовку, талую воду из ледяного забоя откачивают насосом сквозь зонд вниз (см. рис.2,в). Генерируемый насосом перепад давления ΔP создает разрежение над зондом в зоне забоя, благодаря чему на поперечном сечении зонда S возникает подъемная сила F , которая давит на зонд вверх. Заметим, что для создания силы F совсем не обязательно образование ледяной пробки в канале ниже зонда, и гидростатическое давление озерной воды порядка многих сотен атмосфер практически не влияет на силу F , величина которой определяется мощностью насоса и уровнем разрежения ΔP в верхней части зонда. Например, если при давлении 400 атм озерной воды в канале насос обеспечит в зоне верхней термоголовки понижение давления до 390–380 атм, то при диаметре зонда 10 см подъемная сила F может достигнуть 800–1600 кгс. Такая направленная вверх сила F позволит эффективно проплавливать лед, поскольку она многократно превышает вес самого ТГБ-зонда в гравитационном поле тяготения Земли. Эта гидравлическая сила (тяга) позволит ТГБ-зонду самостоятельно подниматься на поверхность льда, практически не нагружая несущий кабель, что невозможно реализовать при использовании RECAS. При этом сохраняется ледяная изоляция самого ТГБ-зонда — как от поверхности льда, так и от подледниковой среды (см. рис.2,в и 3,а), причем вмёрзший в лед кабель выполняет функцию устройства, направляющего движение зонда к поверхности льда. Использование гидравлической тяги вместо троса для подъема зонда резко снижа-

ет прочностные требования к самому кабелю, что позволяет применить компактную энергосберегающую однопроводную систему Tesla для электропитания и телеуправления ТГБ-зонда [6–8].

Особенности зонда для изучения толстых льдов

Отметим, что ТГБ-зонды не предназначены для исследования подвижных льдов и ледников с большими трещинами, полостями и рыхлой структурой. С помощью ТГБ-зондов можно изучать малоподвижные толстые льды и подледниковые среды на глубинах до 5 км на Земле или до 40 км на спутниках Юпитера и Сатурна в течение нескольких месяцев. С целью снижения затрат энергии и времени на плавление льда глубинные зонды должны иметь минимально возможную площадь сечения S . Несущий кабель должен быть достаточно гибким и прочным, иметь малый вес и минимальные потери энергии во время движения зонда внутри толщи льда и глубин озера.

Для приборного отсека ТГБ-зонда следует отобрать или разработать: набор миниатюрных датчиков для исследования физико-химических параметров льда, воды и осадков озера, спектрометр-газоанализатор, видеокамеру, эхолот; бортовой компьютер. Большую часть данных необходимо передавать на поверхность по вмороженному в лед кабелю. В земных условиях все элементы ТГБ-зонда должны сохранять свою работоспособность при температурах от -70°C до $+200^{\circ}\text{C}$ и давлениях до 50 МПа после периодической жесткой стерилизации автоклавированием, озонированием, гамма-облучением.

Из-за малых размеров зондов придется свести к минимуму объем контрольных проб талой воды из льда, воды и донных отложений озера, которые необходимо доставить в лаборатории для исследований. Например, для анализа биологических частиц (клеток) традиционный отбор проб льда (кернов) целесообразно заменить фильтрацией талой воды из тонких каверн большой площади, размываемых зондом (во время его остановки) вокруг ледяной скважины [4, 5]. Чем больше пло-

щадь каверны превышает площадь скважины, тем больше вероятность повысить плотность оседающих на фильтр частиц и микроорганизмов из исследуемого горизонта. Такой «фильтрационный» способ отбора проб воды на стерильные компактные и легкие фильтры снизит вероятность стратиграфической ошибки определения состава и возраста проб, облегчит доставку проб на поверхность для дальнейших физико-химических и микробиологических анализов в лабораторных условиях. Кроме того, компактность и малый вес таких «фильтрационных» проб позволят увеличить количество горизонтов пробоотбора и информативность исследований за одно проникновение ТГБ-зонда в толщу льда и среды под ним. Схема «фильтрационных» отборов проб из тонких каверн во льду, а также воды и донных отложений озера представлена нами подробно в работе [5] и, в общем виде, на рис.3,а, а на рис.3,б приведена принципиальная конструкция ТГБ-зонда для ее осуществления.

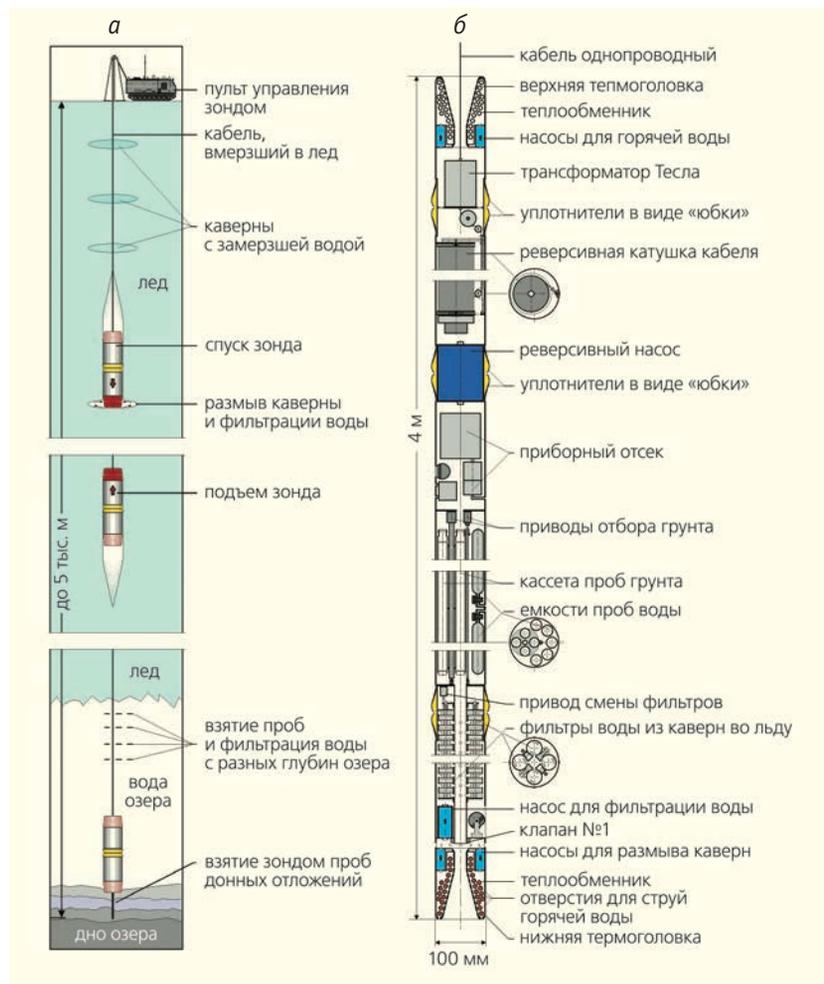


Рис.3. Общая схема герметичного отбора проб льда и подледниковых сред на Земле (а); принципиальная конструкция ТГБ-зонда для отбора проб талой воды из льда, воды озера и донных отложений (б).

В качестве энергоинформационного кабеля длиной 5 км в конструкции такого ТГБ-зонда на гидравлической тяге мы предлагаем использовать однопроводную систему Тесла, которая позволяет уменьшить потери энергии, вес и габариты катушки с кабелем в несколько раз и не допускает короткого замыкания при перекручивании кабеля. Компьютер позволит автоматически поддерживать режим резонанса напряжений однопроводного кабеля, т.е. настраивать собственную частоту резонанса линии при изменении длины кабеля, температуры окружающей среды и других факторов, обеспечивая минимальные потери энергии [6–8]. Например, однопроводный стальной несущий кабель диаметром 0.7 мм и длиной 5 км будет весить всего 13 кг и обеспечит грузоподъемность 50 кгс, что допустимо при малых нагрузках на кабель. Чтобы уменьшить риск обрыва кабеля при извлечении зонда на ледяную поверхность, первые 100 м кабеля должны иметь диаметр 1–2 мм (это повысит его грузоподъемность до 100–400 кгс).

Термоголовку в виде воронки целесообразно выполнить из четырех независимых секций с насосами для размыва каверн во льду и зоны забоя струями горячей воды. Так скорость плавления льда удастся увеличить дополнительно за счет турбулентной теплопередачи, а направление движения зонда изменять разнонаправленными струями горячей воды (например, при обходе различных препятствий во льду, трещин, камней). Перемещениями ТГБ-зонда в глубине озера также можно управлять струями воды из реверсивного насоса при отключенных термоголовках (вниз, вбок, вверх) при нулевой плавучести зонда. Желательно, чтобы в озере вес зонда уравновешивался выталкивающей силой Архимеда, что позволит снизить нагрузку на кабель при перемещениях зонда в толще воды.

Основные материалы конструкции зонда (титан, силикон) должны сохранять свою работоспособность при температуре от -70°C до $+200^{\circ}\text{C}$ и при давлении до 50 МПа, а также выдерживать стерилизацию озонированием. Уплотняющие «юбки» могут быть выполнены из силикона или в виде тонких закрылок из титана. Расчетные параметры ТГБ-зонда, который сможет проникнуть под лед до глубины 5 км, таковы: диаметр — 0.1 м, длина — около 4 м, вес — до 25 кг без кабеля, диаметр однопроводного энергоинформационного кабеля — от 0.5 до 2 мм, средняя скорость движения — до 10 м/ч (при мощности 10 кВт и температуре льда до -60°C). Скорость движения ТГБ-зондов в массиве льда можно повышать, увеличивая мощность насоса и термоголовки. Например, при общей мощности зонда в 20 кВт скорость его можно довести до 30 м/ч.

Приборное оснащение ТГБ-зонда может быть подобно таковому у RECAS. Но при этом желательно применять такие измерительные модули и пробоотборники, принцип действия которых мало зависит от величины абсолютного давления

жидких сред. Например, работа и герметичность фильтров проб воды из каверн во льду, воды озера и донных осадков определяется малым перепадом давления, а не абсолютной величиной давления воды. Это позволит использовать предложенный нами (компактный и легкий) фильтрационный пробоотбор при любых абсолютных давлениях жидких сред на Земле и других планетах.

Отбор биологических проб на заданном горизонте в ледяной толще осуществляется при неподвижном ТГБ-зонде. Для этого отключают нижнюю термоголовку, реверсивный насос и закрывают клапан №1. Включают насосы для размыва каверны во льду при слабом нагреве воды в теплообменниках. После размыва вокруг скважины небольшой по высоте, но значительной по площади каверны во льду насосы и теплообменники отключают. Включают насос для фильтрации и направляют поток воды из каверны сквозь очередной стерильный фильтр, как показано на рис.4,б. Процесс отбора проб многократно повторяется на других горизонтах, что повышает информативность исследований за один цикл работы зонда. Для беспрепятственной проходки ТГБ-зонда сквозь каверну вокруг скважины на корпусе зонда предусмотрено до трех пар уплотняющих «юбок» на расстояниях, превышающих высоту каверны (см. рис.4).

Талая вода в скважине выше зонда быстро замерзает, обеспечивая герметичное проникновение ТГБ-зонда в подледниковое озеро. В озере термоголовку отключают, и спуск ТГБ-зонда осуществляется под действием силы тяжести зонда в воде или гидрореактивной струи. Пробы воды с разных глубин озера пропускаются через фильтры (аналогично фильтрации воды из каверн во льду), а также отбираются в емкости гидростатических батометров, сохраняющих пробы воды под давлением, соответствующем глубине погружения зонда. При достижении дна озера через заборное отверстие в нижней термоголовке выдвигают пробоотборники донных отложений (см. рис.4,в). Пробы грунта засасывают в трубу с запорными клапанами и с помощью приводов грунтоотбора освобождают центральный канал зонда.

При подъеме ТГБ-зонда с пробами на поверхность ледника можно не наматывать кабель на катушку внутри корпуса, а выводить его вниз — за пределы корпуса зонда. После извлечения ТГБ-зонда с пробами на поверхность имеется возможность «нанизать» новый ТГБ-зонд на замороженный в лед кабель и отправить его в толщу льда для дальнейших исследований, но уже без весьма габаритной катушки с кабелем. При этом снимать энергию и информацию можно контактно или бесконтактно специальным роликовым блоком внутри «облегченного» зонда. Такой «облегченный» ТГБ-зонд можно многократно перемещать вниз и вверх по кабелю, как по направляющему монорельсу, не нарушая ледяной изоляции, что позволит существенно снизить финансовые и вре-

менные затраты на проникновение в толщу льда и, соответственно, увеличить объем исследований. Например, вместо катушки с кабелем установить специальные грунтоотборники для детального исследования подледниковой среды на предмет поиска полезных ископаемых.

Эксплуатация ТГБ-зонда на ледяных щитах Земли толщиной до 5 км потребует, по сравнению с RECAS (при одинаковой мощности в 10 кВт), в 5–6 раз меньше топлива и обеспечит сходный объем исследований при сокращении сроков работы в 5–6 раз (не более 50 сут), что позволит организовать системные исследования криосферы, существенно экономя средства и трудозатраты. По нашим оценкам, для обслуживания ТГБ-зонда в полевых условиях достаточно бригады из трех-четырех специалистов, причем силовая установка и пульт управления могут быть размещены на базе одного вездехода (см. рис.3,а).

В настоящее время соотношение *научная отдача / стоимость проекта* выше у проектов ядерного бурения льда, а разработка проекта ТГБ-зонда пока требует серьезных финансовых, материально-технических вложений и усилий. Однако продолжать применять в труднодоступных полярных регионах Земли громоздкие буровые установки с колонковыми бурами и супер-энергоемкие комплексы с горячей водой для системных исследований льдов и подледниковых сред весьма трудозатратно и дорого, а также опасно для экосистем изолированных озер. Автономными ТГБ-зондами можно в десятки раз дешевле, быстрее и точнее определить наиболее интересные места для дальнейших детальных исследований льдов или поиска подо льдом месторождений полезных ископаемых в труднодоступных полярных регионах Земли и других планет.

Проект криобота VALKYRIE

Упомянувшийся выше криобот VALKYRIE специалисты из США планируют создать и доставить космическим кораблем вместе с источником энергии на ледяную поверхность юпитерианской Ев-

ропы уже в ближайшие 20 лет [3]. Ежегодно НАСА выделяет до \$30 миллионов для развития этой миссии к Европе, в ходе которой будет идти поиск возможных признаков обитаемости в океане спутника Юпитера.

Эскиз криобота VALKYRIE представлен на рис.5,а. Он отличается от термобуров, проплавающих лед термоголовкой под давлением собственного веса, испусканием струй горячей воды в ледяной забой. Предполагается, что криобот будет потреблять энергию от источника с ядерным топливом, расположенным на поверхности спутника, через лазер мощностью до 250 кВт. В качестве кабеля для подвода энергии лазера к криоботу предполагается использовать оптическое волокно толщи-

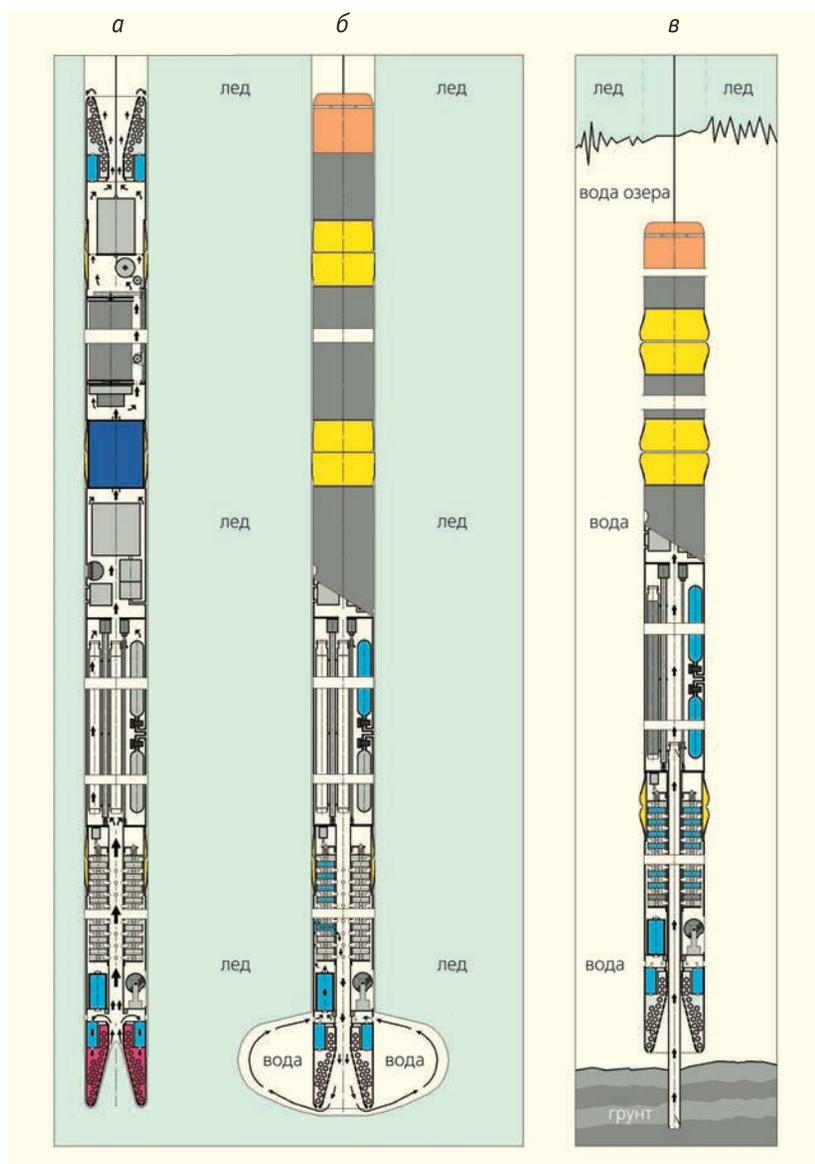


Рис.4. Схемы работ ТГБ-зонда во льду и в подледниковой среде: ТГБ-зонд при движении вниз (а); схема фильтрации талой воды из каверны во льду (б); отбор проб грунта со дна озера (в).

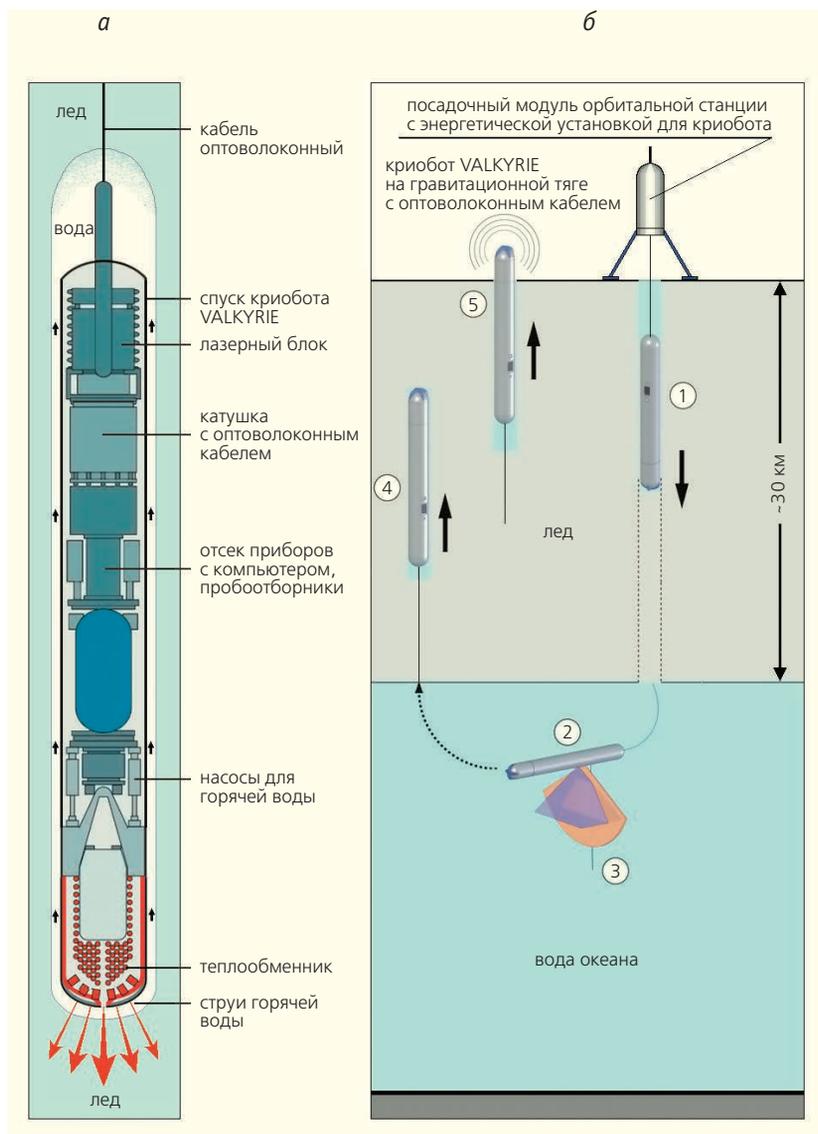


Рис.5. Проект НАСА для исследования льда Европы, спутника Юпитера: проектируемый в НАСА криобот VALKYRIE при бурении льда вниз (а); этапы работ криобота VALKYRIE (б): 1 — спуск через лед; 2 — поворот в воде и проход 1 км подо льдом; 3 — съемки рельефа дна боковым эхолотом; 4 — поворот в воде и подъем сквозь лед; 5 — выход на поверхность льда. Рисунок НАСА.

ной в несколько микрометров. Несущий энергоинформационный кабель на катушке расположен внутри криобота. При испытаниях на Аляске макет такого криобота длиной 1.6 м, диаметром 0.45 м и мощностью 5 кВт пробурил лед на глубину 30 м при скорости проходки 1 м/ч.

Поскольку лед на поверхности Европы имеет температуру в диапазоне от -160°C до -220°C , то талая вода, образовавшаяся при термическом бурении, будет быстро замерзать над верхним торцом корпуса криобота, вмораживая в скважину энергоинформационный несущий кабель, который соединяет криобот с источником энергии на поверхности.

предотвращающих плавление кварцевых блоков внутри криобота). Результаты следующих (планировавшихся в 2015 г. на Аляске) полевых испытаний макета криобота, для извлечения которого предполагалось использовать стальной несущий кабель, нам неизвестны.

На рис.5,б показана схема спуска криобота сквозь 30-километровую толщу льда (позиция 1) в подледный океан, предложенная разработчиками из США. После проникновения в водную среду планируется поменять расположение центра тяжести и плавучести у криобота так, чтобы в горизонтальном положении он мог бы проплыть подо льдом 1 км и боковым эхолотом провести батиметрию.

В толще льда Европы, в пределах скважины, криобот VALKYRIE будет бурить лед струями горячей воды, прижимаясь к ледяному забою собственным весом, который в 10 раз меньше, чем на Земле, из-за слабой силы тяготения на луне Юпитера. В таких условиях криобот, опираясь на струи, будет висеть внутри водяного кокона, обтекаемый потоками горячей воды, причем более 90% тепла бесполезно уйдет в боковые стенки скважины, а скорость бурения льда окажется ниже, чем в условиях на Земле, т.е. меньше 1 м/ч.

Простое увеличение мощности струй горячей воды еще больше оттолкнет криобот от ледяного забоя, что уменьшит теплоотдачу термоголовки и скорость бурения льда. На такое бурение льда толщиной 30 км сначала вниз, а затем вверх, для возвращения на ледяную поверхность Европы, может потребоваться более восьми лет.

Разработчики VALKYRIE, понимая, что затраты энергии на плавление льда пропорциональны квадрату диаметра ледяного забоя, решили уменьшить диаметр корпуса криобота с 0.45 до 0.25 м при общей его длине в 2.8 м. Следует заметить, что дальнейшее уменьшение диаметра зонда не допускают физико-технические свойства оптоволоконного кабеля на катушке внутри криобота (имеющие ограничения как по радиусу изгиба и пределу передаваемой мощности в одном оптическом кварцевом волокне, так и по размерам специальных лазерных модулей,

метрическую съемку рельефа дна океана, как показано на рис.5,б (позиции 2 и 3). Затем, переместив центр тяжести еще раз и увеличив плавучесть, развернуть криобот термоголовкой вверх и начать проплавливать лед, поднимаясь на поверхность сквозь его толщу в 30 км (позиция 4). При этом сила давления на ледяной забой будет определяться разностью между подъемной силой Архимеда и силой тяжести криобота. По оценке американских специалистов, скорости подъема и спуска криобота во льду будут соизмеримы, а место его выхода на поверхность юпитерианского спутника определят по радиомаяку (позиция 5), как показано на рис.5,б.

Многие специалисты считают, что человечество еще далеко от технологий, которые сделают возможным создание такого робота. Разработчики криобота VALKYRIE (в частности, Билл Стоун — основатель Stone Aerospace) надеются, что в ближайшем десятилетии они решат проблему передачи энергии мощностью до 100 кВт через оптоволоконный кабель длиной 60 км, что позволит сравнительно быстро проникать сквозь многокилометровые льды. Стоун и его команда возвращаются на Аляску, чтобы продолжить испытания криобота VALKYRIE, пока НАСА платит за эту разработку.

Мы же, со своей стороны, полагаем, что для успешной реализации этого проекта были бы полезны технологии, заложенные в конструкцию ТГБ-зондов: во-первых, применить в криоботе-зонде технологию увеличения скорости термического плавления льда под воздействием гидравлической силы, что позволит такому устройству бурить лед со скоростью до 50 м/ч и подниматься на поверхность льда самостоятельно, без нагрузки на энергоинформационный кабель; во-вторых, использовать однопроводную систему Тесла для передачи энергии и телеуправления криоботом, что позволит уменьшить вес и габариты кабеля, потери энергии, а также исключить короткое замыкание кабеля.

ТГБ-криобот для луны Юпитера

На рис.6 представлен предлагаемый авторами эскизный проект ТГБ-криобота, принципиальная конструкция которого должна содержать: одинаковые воронкообразные термоголовки на концах корпуса зонда; сквозной канал для протока талой воды и сматывания кабеля с катушки внутри криобота; реверсивный гидронасос внутри и уплотнители-«юбки» снаружи. Спуск (рис.6,а) и подъем (рис.6,б) такого ТГБ-криобота в толще льда Европы подобен движению и схеме исследований ТГБ-зонда в толще льда на Земле (см. рис.3,а и рис.6,з). Отстрелив в водной среде нижнюю термоголовку (она больше не нужна), зонд может провести батиметрическую съемку рельефа дна океана торцевым эхолотом (см. рис.6,в). Диапазон батиметри-



Билл Стоун — автор идеи криобота VALKYRIE.

ческих исследований дна и поверхности раздела лед—вода можно значительно расширить, опустив ТГБ-криобот в океан на глубину до 10 км и управляя водометами реверсивного насоса, что позволит отклонять зонд на несколько километров от вертикали спуска (как показано на рис.6,з).

При подъеме ТГБ-криобота с пробами на поверхность ледника можно не наматывать кабель на

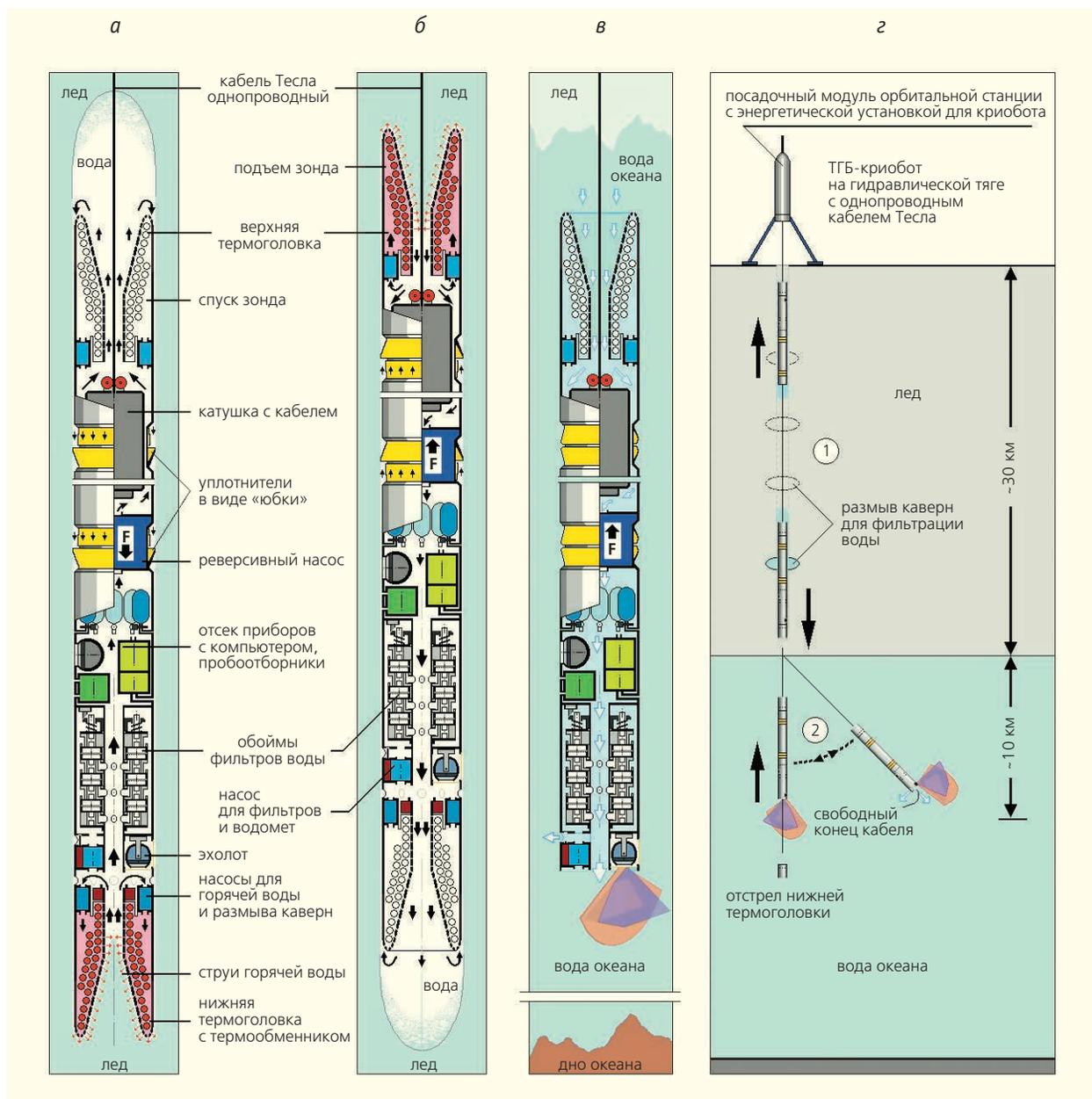


Рис.6. Авторский проект ТГБ-крибота для исследования льда Европы: предлагаемый ТГБ-крибот при спуске во льду под давлением силы F (а); подъем ТГБ-крибота во льду под действием подъемной силы F (б); ТГБ-крибот в воде океана Европы после отстрела нижней термоголовки (в); этапы работ ТГБ-крибота: 1 — спуск и подъем ТГБ-крибота на гидравлической тяге по несущему кабелю; 2 — спуск в океан, отстрел нижней термоголовки, съемки рельефа дна и поверхности раздела лед—вода торцевым и боковым эхолотом крибота (г).

катушку внутри зонда, а выводить его сквозь крибот за пределы корпуса, вниз. После извлечения крибота с пробами на поверхность имеется возможность «нанизать» на замороженный в лед кабель другой ТГБ-крибот, но уже без габаритной катушки, и отправить такой «облегченный» зонд в толщу льда для дальнейших исследований.

По сравнению с проектируемым американцами криботом VALKYRIE предлагаемый нами ТГБ-крибот позволит:

- снизить примерно в 10 раз мощность источника питания, который необходимо доставить на ледяную поверхность Европы;
- уменьшить диаметр зонда в два-три раза и увеличить скорость бурения на порядок — до 50 м/ч;
- уменьшить в несколько раз диаметр катушки с кабелем, применив однопроводную систему Тесла, поскольку в ней минимальны ограничения по радиусу изгиба однопроводного кабеля и пределу

передаваемой мощности, исключены короткие замыкания, а потери энергии в режиме резонанса напряжений ничтожно малы;

— значительно ускорить возврат криобота с пробами на ледяную поверхность Европы, используя гидравлическую силу подъема, которая может на два порядка превысить подъемную (гравитационную) силу Архимеда;

— сократить цикл исследований льда и подледного океана Европы с восьми лет до четырех месяцев при средней скорости движения криобота 30 м/ч;

— уменьшить в несколько раз объем и массу криобота, затраты на его доставку к спутнику Юпитера и, соответственно, многократно снизить риски космической миссии и стоимость всех необходимых работ.

Для реализации проектов ТГБ-криоботов необходимы заказчики и профессиональные разработчики новых технологий, предназначенных для изучения ледяных щитов Земли и других планет. Получение уникальных знаний о пределах распространения жизни и эволюции планет Солнечной системы заслуживает подобных усилий. ■

Литература

1. *Makinson K., Pearce D., Hodgson D.A. et al.* Clean subglacial access: prospects for future deep hot-water drilling. *Phil. Trans. R. Soc. A.* 2016; 374 (2059): 20140304.
2. *Talalay P.G., Zagorodnov V.S., Markov A.N. et al.* Recoverable autonomous sonde (RECAS) for environmental exploration of Antarctic subglacial lakes: general concept. *Annals of Glaciology.* 2014; 55 (65): 23–30.
3. *Stone W.C., Hogan B., Siegel V. et al.* Progress towards an optically powered cryobot. *Annals of Glaciology.* 2014. 55(65): 1–13.
4. *Зеленчук А.В., Крыленков В.А., Гилева В.Г. и др.* Устройство для отбора проб компонентов живых систем в ледниковых и подледниковых отложениях. Патент России №131409 от 25.10.2012. [*Zelenchuk A.V., Krylenkov V.A., Gileva V.G. et al.* Sampling the components of living systems in glacial and subglacial deposits. Patent of Russia No.131409 of 25.10.2012. (In Russ.)]
5. *Зеленчук А.В., Зеленчук В.А., Крыленков В.А.* Термогидробур для изучения льдов, ледников и подледниковых озер. Сб. трудов II Международной научно-практической конференции «Природная среда Антарктики: современное состояние изученности». Беларусь, Нарочь, 2016: 137–142. [*Zelenchuk A.V., Zelenchuk V.A., Krylenkov V.A.* Thermal hydraulic boring drill for studying ice, glaciers and subglacial lakes. Proc. of the II International Scientific and Practical Conference «The Natural Environment of the Antarctic: The Present State of Exploration», Belarus, Naroch, 2016: 137–142. (In Russ.)]
6. *Кадомская К.П., Кандаков С.А., Лебедев Д.М.* Об однопроводной системе передачи силовой электрической энергии. Сб. научных трудов НГТУ. 2011; 2(64): 123–134. [*Kadomskaya K.P., Kandakov S.A., Lebedev D.M.* Ob odnoprovodnoy sisteme peredachi silovoy elektricheskoy energii. On a single-wire transmission system of power electrical energy. Proceedings of NSTU. 2011; 2(64): 123–134. (In Russ.)]
7. *Bank M., Haridim M., Tsingouz V., Ibragimov Z.* Highly effective handset antenna. *Int'l J. of Communications.* 2012; 6(2): 80–87.
8. *Стребков Д.С., Некрасов А.И.* Резонансные методы передачи и применения электрической энергии. (Изд. 4-е, перераб. и доп.) М., 2013. [*Strebkov D.S., Nekrasov A.I.* Rezonansnyye metody peredachi i primeneniya elektricheskoy energii. Resonance transmission technique and application of electrical energy. Moscow, 2013. (In Russ.)]

Cryobots for study of the ice sheets of the Solar system planets

A.V.Zelenchuk¹, V.A.Krylenkov¹

¹OOO Scientific-technical company LVPT (Moscow, Russia)

The technology of increasing conversion ratio of cryobot heat energy into melting energy of the ice under the pressure of the hydraulic power generated by the cryobot itself enable to safely increase the capacity of the thermal head and the thermal ice-drilling speed. The one-wire system Tesla of the cryobot electrical power system allows to reduce the cable drum size inside the cryobot and the loss of power. The consumption of hydraulic power (propulsion) allows the cryobot independently rise to the ice surface unladen the cable. Implementation of the devised scheme and designs of the hydraulic drilling cryobot (THD-cryobot) will allow to organize system studies of the glaciers and subglacial environments on the Earth (to a depths of up to 5 km) and other planets (in particular, on the satellite of Jupiter — Europa — where the ice thickness is up to 30 km), without disturbances of their ice insulation by multiple cost cutting, energy and time.

Keywords: thermal drill-probe, hydraulic power, single-wire Tesla system, THD-cryobot, ice studies on Europa the natural satellite of Jupiter on the Earth.