

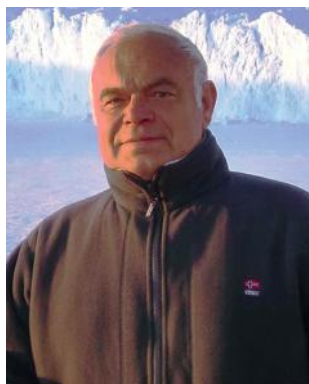
## Зонды для исследования ледяных щитов Земли и других небесных тел

А.В. ЗЕЛЕНЧУК,  
кандидат технических наук

В.А. КРЫЛЕНКОВ,  
доктор биологических наук

В.А. ЗЕЛЕНЧУК,  
инженер-конструктор  
"Научно-техническая фирма "СВИТ", Москва

---



Авторами статьи предложена технология увеличения скорости термического бурения льда под воздействием гидравлической силы, генерируемой термобуром. Она позволяет повысить ко-

эффициент преобразования тепловой энергии в энергию плавления льда и безопасно увеличить мощность термобура. Авторы представили также принципиальные конструкции и схемы работы

термического гидравлического бурового зонда для исследования толщи льдов и подледниковых водных сред на Земле, на крупных спутниках Юпитера и Сатурна, покрытых ледяными "щитами".

## ЗАЧЕМ ИССЛЕДОВАТЬ ЛЕДЯНЫЕ ЩИТЫ ПЛАНЕТ?

Изучение ледяных щитов, подледниковых водных сред и донных отложений в Арктике и Антарктике, поиск признаков жизни в экстремальных условиях, хронологических горизонтов, содержащих геологическую летопись о палеоклиматических изменениях, происходивших в прошедшие геологические эпохи, позволит расшифровать уникальную информацию об эволюции Земли и других планет. Эти знания необходимы для понимания процессов глобального потепления климата, а также для прогноза природных катастроф в целях обеспечения безопасной среды обитания людей на нашей планете.

Существование криосферы, как полагают ученые, типично не только для Земли, но и для спутников Юпитера (Ганимед, Каллисто и Европа) и Сатурна (Диона, Энцелад), для полюсов Марса. Создание и применение зондов для экологически безопасных исследований озера Восток в Антарктиде позволило бы астробиологам уже на Земле многое узнать о свойствах и эволюции хо-

лодных миров Солнечной системы. Перед отправкой таких зондов, например, на спутник Юпитера Европу (где толщина льда достигает 30 км, а глубина подледного океана – до 100 км), необходимо провести их испытания в

районе российской станции "Восток", где расположено подледниковое реликтовое озеро Восток, покрытое льдом толщиной до 4 км, которое было изолировано от окружающей среды на протяжении 15 млн лет.

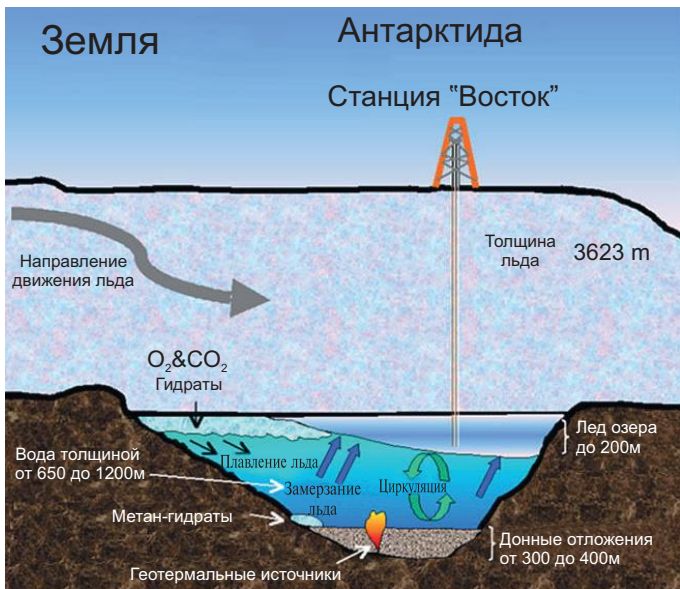


Схема разреза толстых льдов и подледниковых сред на Земле и на спутнике Юпитера Европе. Рисунок NASA/JPL-Caltech.

Ученые надеются обнаружить следы жизни в глубинах озера Восток, но опасаются, что в результате негерметичного доступа в подледниковое озеро – через открытые скважины во льду – могут быть нарушены режимы термобарического равновесия и фазового перехода по всей поверхности раздела лед–вода, что неизбежно приведет к загрязнению и нарушению экологии реликтового озера.

Требование экологически чистого доступа к подледниковым средам сопряжено со значительными инженерными и материально-техническими проблемами, причем в настоящее время есть лишь два примера глубинного (до 4 км) бурения льда с открытым доступом к подледниковой среде: с помощью механического бура (колонковое бурение с отбором керна), с использованием технологий термического проплавления при гидродинамическом бурении льда.

Классические электромеханические буровые установки громоздки, энергоемки, их эксплуатация сопряжена с большими трудовыми и

транспортными затратами; причем скважина глубиной более 500 м должна быть заполнена незамерзающей буровой жидкостью для предотвращения деформации ее стенок под действием горного давления во льду. Токсичная буровая жидкость влияет на качество ледяных кернов и проб, извлекаемых из глубин, и может попасть в водную среду подледникового озера. Тем не менее за более чем 20 лет из сверхглубокой скважины на станции "Восток" с помощью колонковых буров добыты тысячи кернов льда, изучение которых дало уникальную информацию о палеоклиматических изменениях, происходивших на Земле в течение сотен тысяч лет (Земля и Вселенная, 2017, № 2). Единственные пока образцы озерной воды, добытые российскими учеными в результате гидроразрыва нижней части скважины и/или путем бурения (при повторном проникновении в озеро), оказались непригодными для биологического (клеточно-молекулярного) анализа, так как подвергались воздействию бурового раствора<sup>1</sup>. К сожалению, в кернах надозерного льда, где присутствуют следы буровой жидкости, сложно выявить уникальные организмы. Кроме того, признаки жизни в озере Восток

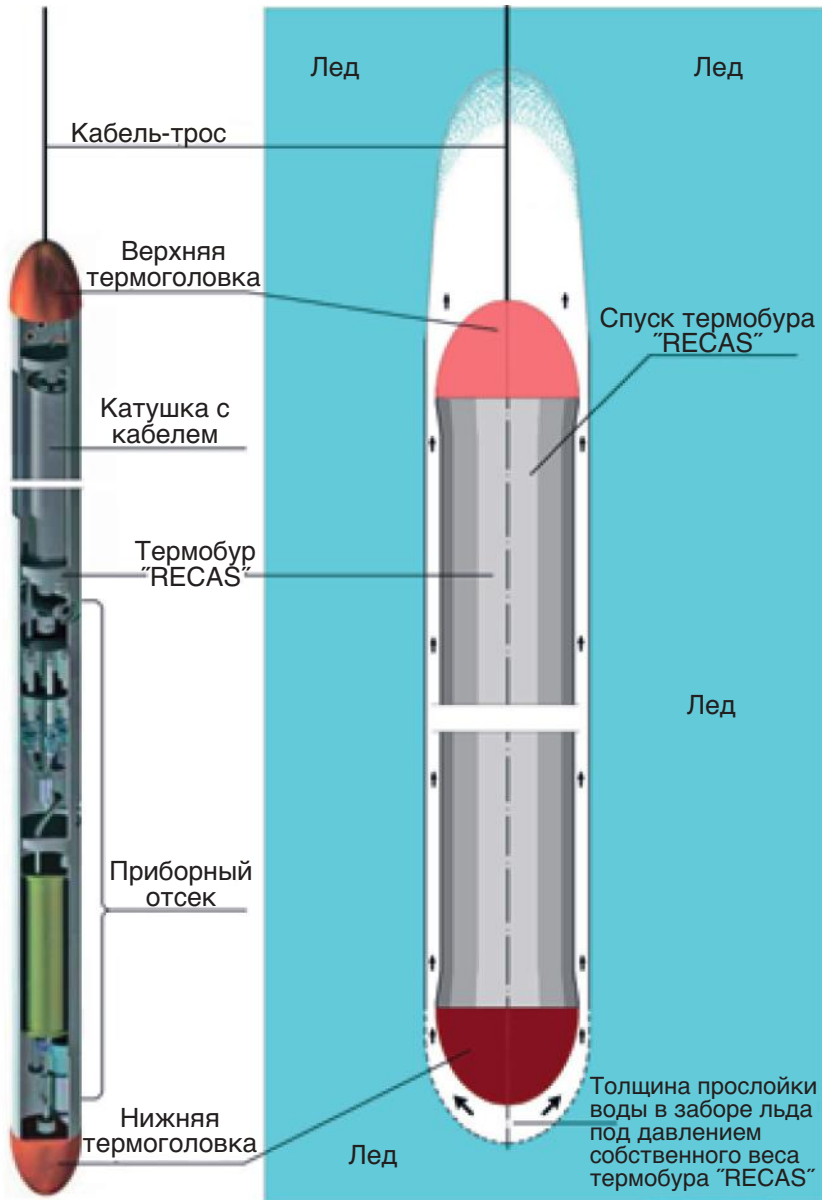
(если она существует), скорее всего, следует искать ближе к его дну, которого можно достигнуть при разработке и применении новых технологий и зондов для герметичных подледниковых исследований.

Проплавление толщи льда способом гидродинамического бурения (проплавление льда горячей водой; Clean Hot Water Drills, CHWD) имеет большую скорость проходки, но неэффективно из-за больших потерь тепла. Кроме того, обустроенная таким способом скважина доступна для изучения подледной среды с помощью различных зондов и приборов не более 24 ч – пока она не замерзнет, что является существенным недостатком CHWD-технологии<sup>2</sup>.

Громоздкие буровые установки с колонковыми бурями и комплексы с использованием горячей воды, вес которых исчисляется сотнями тонн, а энергетические затраты превышают 5 МВт, не позволяют организовать системные исследования толстых льдов (т.н. ледяных щитов) и подледниковых водных сред в полярных труднодоступных регионах. Следует учитывать, что любой доступ к изолированным озерам через открытые скважины изменит режимы

<sup>1</sup>*Bulat S.A.* Microbiology of the subglacial Lake Vostok: first results of borehole-frozen lake water analysis and prospects for searching for lake inhabitants //Phil. Trans. R. Soc. A, 2016. T. 374. №. 2059. C. 20140292.

<sup>2</sup>*Makinson K. et al.* Clean subglacial access: prospects for future deep hot-water drilling //Phil. Trans. R. Soc. A, 2016. T. 374. №. 2059. C. 20140304.



*Термобур "RECAS" проплавляет лед под давлением собственного веса. Показана водяная прослойка между льдом и термоголовкой "RECAS". Рисунок авторов статьи.*

термобарического равновесия и фазового перехода по всей поверхности раздела лед-вода, что нарушит экологию реликтовых

озер. Поэтому необходимо создавать мобильные автономные зонды, которые позволили бы герметично проникать в подледниковые

среды, были бы в десятки раз дешевле и были способны быстрее и точнее определять наиболее интересные места для дальнейших

детальных исследований льдов как на Земле, так и на других планетах.

#### ЗОНДЫ ДЛЯ ГЕРМЕТИЧНОГО ПРОНИКНОВЕНИЯ В ПОДЛЕДНИКОВУЮ СРЕДУ

В недавней публикации приведены сведения о разработке "RECAS" (Recoverable autonomous sonde – извлекаемый автономный зонд) для термического бурения (проплавления) льда<sup>3</sup>. Зонд "RECAS" оснащен двумя термоголовками на торцах его корпуса, внутри него размещены приборный отсек и катушка с несущим кабелем, причем последний соединен с электрогенератором и пультом управления на ледяной поверхности. По мнению разработчиков, такое устройство позволит отбирать пробы талой воды изо льда и водной среды озера, проводить их анализ, "оставаясь в изоляции" от поверхности льда.

В то время как нижняя термоголовка плавит лед, "RECAS" под действием собственной силы тяжести (десятки килограммов) движется вниз, а несущий (движущийся) кабель выходит через небольшое центральное отверстие в верхней термоголовке. Талая вода в

скважине выше зонда быстро замерзает и "охватывает" неподвижный кабель, обеспечивая тем самым ледяную изоляцию зонда и подледниковой среды от поверхности ледника. Таким образом, устройство движется сквозь лед внутри герметичного кокона, заполненного талой водой. Для того, чтобы поднять зонд, несущий кабель с усилием, создаваемым электромеханическим приводом, его наматывают на катушку, находящуюся внутри зонда, а верхняя термоголовка плавит лед. Сила, с которой зонд давит на ледяной забой, определяется силой натяжения кабеля. Талая вода ниже зонда в скважине быстро замерзает, обеспечивая ледяную изоляцию подледниковой среды.

Этот зонд, диаметром 150 мм и длиной 4 м, оснащен электрогенератором мощностью 9–10 кВт, причем ожидаемая скорость его движения в толще (матрице) льда может достигнуть 1,7 м/ч.

По оценкам разработчиков, цикл исследований льда с помощью такого зонда на глубинах до 5 км потребует 8–9 месяцев при расходе не менее 12 т топлива и наличия небольшого штата (4–5 специа-

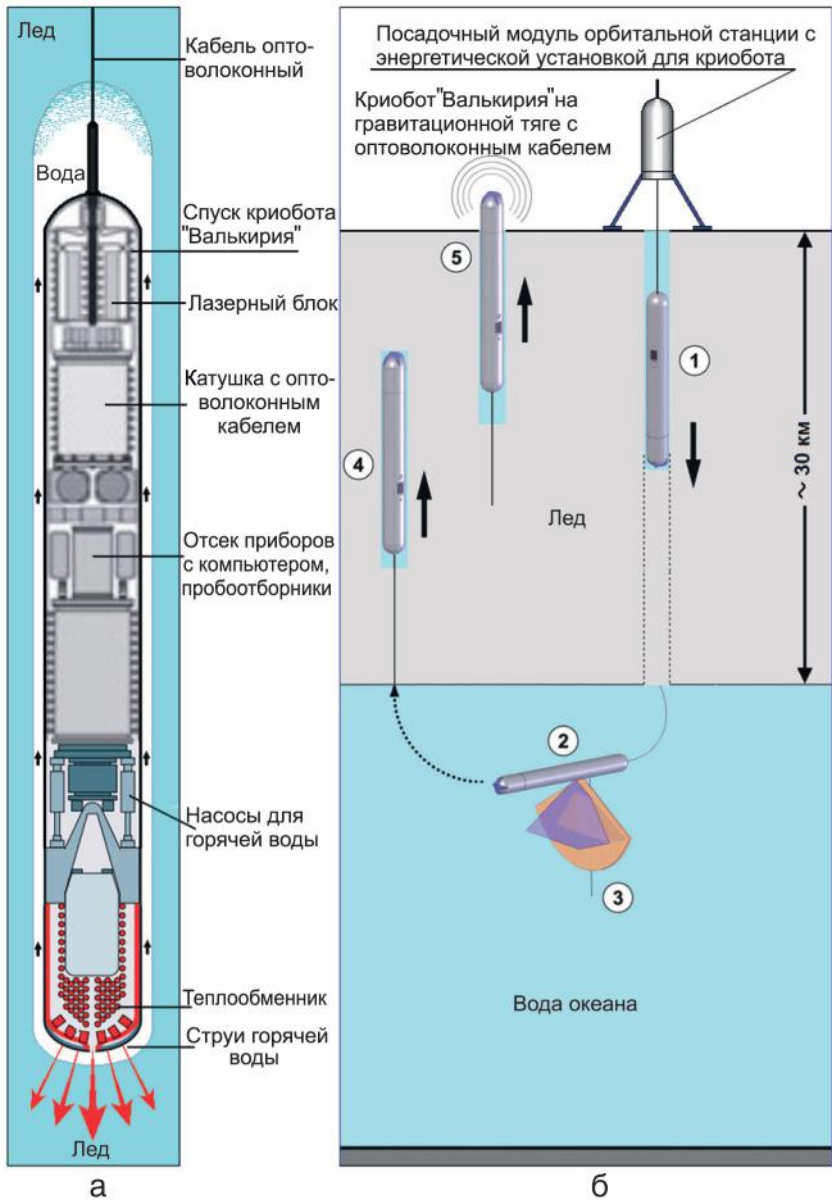
листов) для управления и обеспечения "RECAS", что в 10–20 раз дешевле, чем применение электромеханического бурения или бурения горячей водой. Однако, его использование все же потребует много времени и топлива, что не позволит провести полный цикл исследований в период сезонных работ в Арктике и Антарктике (за 2–3 месяца). Кроме того, большая механическая нагрузка на несущий кабель при подъеме может привести к его обрыву и потере зонда.

Главным недостатком термических буров типа "RECAS", проплавливающих толщу льда под давлением собственного веса, является малая скорость бурения вследствие большого термического сопротивления водяной прослойки в ледяном забое (между льдом и термоголовкой). Ток талой воды снаружи корпуса зонда, направленный против движения "RECAS", дополнительно уменьшает скорость движения устройства и увеличивает потери тепла через боковые стенки ледяной скважины.

Простое повышение мощности термоголовки, направленное на увеличение скорости бурения льда, может привести к парообразованию, что снизит

---

<sup>3</sup>Talalay P.G. et al. Recoverable autonomous sonde (RECAS) for environmental exploration of Antarctic subglacial lakes: general concept // Annals of Glaciology, 2014. V. 55 (65). P. 23–30.



Проект эксплуатации криобота "Валькирия" фирмы "Stone Aerospace" – исследование льда и водной среды на спутнике Юпитера Европе: а – при бурении льда вниз; б – этапы работ криобота (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 NASA.

теплоотдачу в ледяной забой, а термоголовка-нагреватель может перегореть.

Поэтому для безопасного увеличения мощности термоголовки, и, соответствен-

но, скорости бурения, следует увеличить теплоотдачу от нагревателя в толщу льда.

В США геолог Питер Доран и основатель аэрокосмической инженерной фирмы "Stone Aerospace" (США) Билл Стоун собрали команду. В нее вошли исследователи полярных регионов и планет, которые разрабатывают роботизированный комплекс-криобот "Валькирия" ("Valkirie") для поиска жизни в подледниковых озерах в Антарктиде и на планетах Солнечной системы. В ближайшие 20 лет специалисты "Stone Aerospace" при финансовой поддержке NASA планируют доставить с помощью космического аппарата – криобота "Валькирия" – со штатным источником электроэнергии – (ядерная установка) на спутник Юпитера Европу для исследования льда толщиной до 30 км и подледного океана с глубинами до 100 км<sup>4</sup>.

Криобот "Валькирия" отличается от термобуров, проплавляющих с помощью термоголовки лед под давлением собственного веса тем, что он испускает струи горячей воды в ледяной забой. Предполагается, что криобот будет потреблять энергию, генерируемую с помощью лазера мощностью 250 кВт, питаемого от источника с ядерным топливом, рас-

положенного на ледяной поверхности Европы. Для "доставки энергии" лазера к криоботу предполагается использовать оптическое волокно – кабель толщиной в несколько микрон, который намотан на катушку, размещенную в корпусе криобота. При испытаниях на Аляске макет такого криобота длиной 1,6 м, диаметром 0,45 м и мощностью в 5 кВт "пробурил" лед, достигнув глубины 30 м при скорости проходки примерно 1 м/ч.

Поскольку лед на поверхности Европы имеет температуру в диапазоне от  $-160^{\circ}$  до  $-220^{\circ}$  С, то талая вода, образовавшаяся при термическом бурении, будет быстро замерзать над верхним торцом корпуса криобота, вмораживая в скважину несущий кабель, соединяющий криобот с источником энергии на поверхности. В толще льда, в пределах скважины с водой, криобот будет бурить лед горячей водой, прижимаясь внизу к ледяному забою силой тяжести собственного веса. Однако следует учесть, что на спутнике Юпитера сила тяготения в 10 раз меньше, чем на Земле, поэтому бурение льда под давлением, равным небольшой силе тяжести самого криобота, на Европе может обернуться потерями до

90% тепла через боковые поверхности (стенки) скважины, а скорость бурения льда может оказаться значительно ниже, чем на Земле, то есть меньше 1 м/ч. На такое бурение льда (вниз и вверх) толщиной 30 км на Европе потребуется более 8 лет.

Понимая, что затраты энергии на плавление льда пропорциональны квадрату диаметра ледяного забоя, специалисты "Stone Aerospace" решили уменьшить диаметр корпуса криобота с 0,45 м до 0,25 м при общей его длине 2,8 м. Причем следует заметить, что дальнейшее уменьшение диаметра этого зонда невозможно из-за физико-технических свойств оптоволоконного кабеля, намотанного на катушку внутри корпуса криобота. Кабель имеет ограничения по радиусу изгиба и пределу передаваемой мощности в оптическом кварцевом волокне, а также в размерах специальных лазерных модулей, предотвращающих плавление кварцевых блоков внутри криобота. Результаты полевых испытаний макета криобота на стальном несущем кабеле, которые планировались на Аляске в 2015 г., авторам данной статьи не известны.

Разработчики "Stone Aerospace" предложили схему спуска криобота сквозь

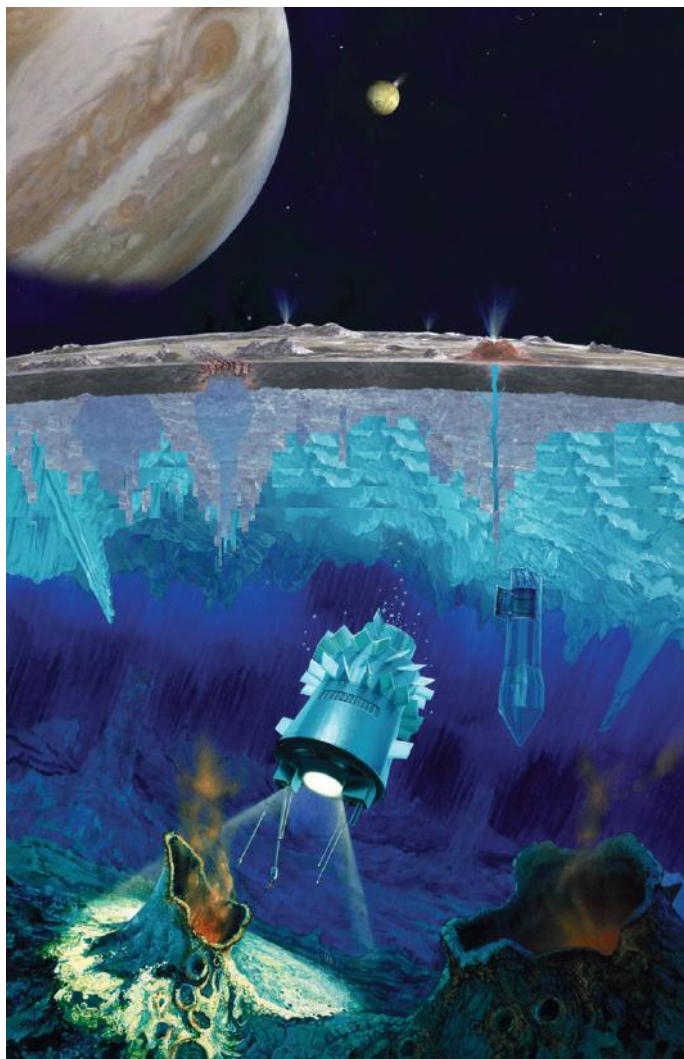
---

<sup>4</sup>Stone W.C., Hogan B., Siegel V., Lelievre S., Flesher C. Progress towards an optically powered cryobot // Annals of Glaciology. 2014. V. 55 (65). С. 1–13.

Крибот "Валькирия" проби-  
вается через ледяную кору  
спутника Юпитера Европы и  
выпускает гидрозонд для ис-  
следования подледного океа-  
на. Рисунок NASA.

30-км толщю льда в под-  
ледный океан (см. рис. на  
стр. 52; спуск вниз, пози-  
ция 1). После проникнове-  
ния в водную среду пла-  
нируется изменить центр  
тяжести и плавучесть крио-  
бота так, чтобы в гори-  
зонтальном положении он  
был бы способен проплыть  
подо льдом 1 км и с по-  
мощью бокового эхолота  
провести батиметрическую  
съемку рельефа дна океа-  
на (там же; позиции 2 и 3).  
Затем, еще раз изменяя  
центр тяжести и увеличива-  
вая плавучесть, планиру-  
ется развернуть крибот  
термоголовкой вверх и  
проплавливать лед, подни-  
маясь к поверхности сквозь  
ледяную толщю в 30 км  
(позиция 4). При этом сила  
давления в ледяной забой  
определяется разностью  
между подъемной силой  
Архимеда и силой тяжести  
крибота на спутнике Юпи-  
тера. По оценке специали-  
стов, скорости подъема и спу-  
ска крибота в толще льда  
будут соизмеримы, а место  
выхода крибота на поверх-  
ность Европы определяют по  
радиомаяку (позиция 5).

Разработчики крибота  
"Валькирия" надеются, что  
в ближайшем десятилетии  
они решат проблему пере-



дачи энергии мощностью  
250 кВт через оптоволокон-  
ный кабель длиной 60 км,  
что обеспечит проникнове-  
ние исследовательского  
зонда сквозь многокиломе-  
тровые льды Европы.

Для изучения водной сре-  
ды подледного океана спут-  
ника Юпитера после про-  
никновения крибота через  
толщю льда в 30 км из кор-  
пуса «Валькирии» планиру-  
ется выпустить в воду ком-

пактный робот-гидрозонд.

Общим и главным не-  
достатком термических  
буров "RECAS" и "Вальки-  
рия", проплавливающих толщю  
льда под давлением собс-  
твенного веса, является  
малая скорость бурения  
из-за большого термическо-  
го сопротивления водяной  
прослойки в забое между  
льдом и термоголовкой,  
что весьма снижает перс-  
пективы их применения для



бурения толстых льдов. Например, за время одного исследования с помощью этих зондов (от 1 до 8 лет) изгибы и сдвиги даже относительно стабильных и толстых ледовых покровов могут повредить несущий кабель, что приведет к потере этих устройств. Многочисленные попытки увеличить скорость бурения, оптимизируя формы и режимы работы термоголовок, не привели к перспективным конструкторским решениям. Возможности конструкций "RECAST" и "Валькирии" оказались исчерпанными, и возникла необходимость в новых идеях.

#### ПРИНЦИПЫ СКОРОСТНОГО БУРЕНИЯ ЛЬДОВ

С целью безопасного увеличения мощности термоголовки и скорости движения термобура необходимо снизить термическое сопротивление прослойки талой воды в ледяном забое за счет создания дополнительной силы, воздействующей на термобур. На больших глубинах, недостижимых для прямого силового воздействия на термобур-зонд с ледо-

вой поверхности, авторы этой статьи предлагают использовать гидравлическую силу, которая может быть создана за счет перепада давления воды на концах (торцах) зонда<sup>5</sup>.

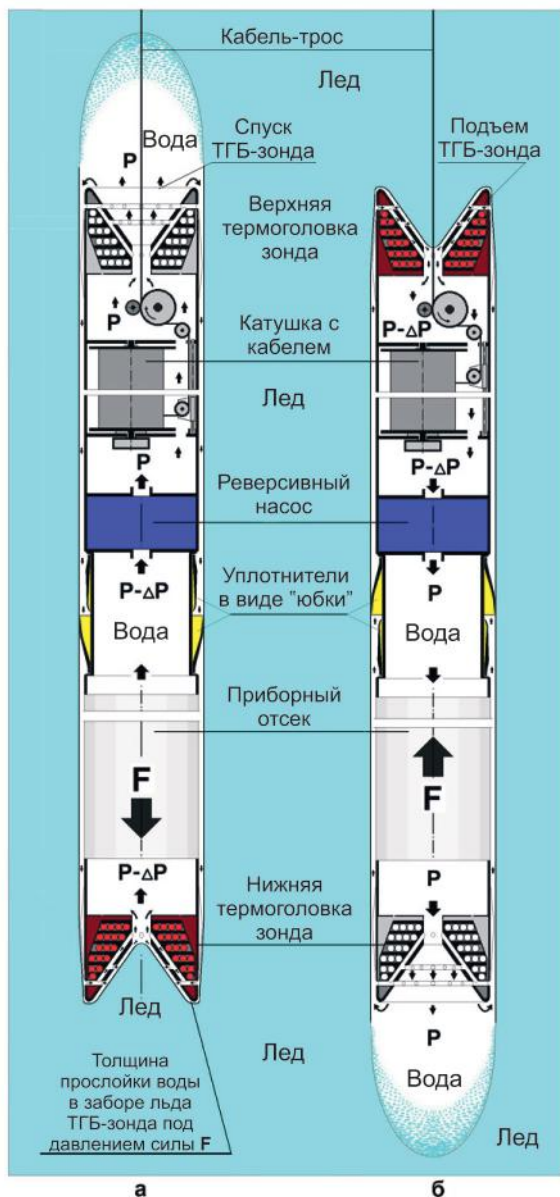
Авторы предлагают проект термического гидравлического бурового зонда (ТГБ-зонд) для исследования толстых льдов и подледниковых водных сред. Верхний и нижний торцы трубчатого корпуса ТГБ-зонда оснащены термоголовками в виде воронок с каналами, предназначенными для перекачки талой воды сквозь корпус зонда. В отличие от параболических термоголовок их воронкообразная форма удобна для откачивания талой воды из ледяного забоя через зонд; причем такая их форма позволяет фокусировать тепловое излучение в центре ледяного забоя и уменьшать потери тепла через боковые поверхности скважины. В корпусе зонда размещены реверсивные гидронасос и привод катушки с несущим кабелем, который "выводится" за пределы зонда через отверстие в верхней термоголовке. Над

нижней термоголовкой размещается приборный отсек зонда с приводами для взятия проб слоев воды и донного грунта. Для передачи энергии и информации предусмотрен способ контактного (или бесконтактного) съема электроэнергии с несущего кабеля. В углубления по периметру внешнего корпуса ТГБ-зонда вмонтированы пары разнонаправленных уплотнителей в виде "юбок"<sup>6</sup>.

Когда зонд движется вниз, включается нагрев нижней термоголовки, а из ледяного забоя с помощью насоса талая вода откачивается сквозь зонд в верхнюю (над его корпусом) часть скважины. В зоне ледяного забоя создается разрежение в системе водная среда – лед, под действием которого возникает обратный ток талой воды через зазор между ледяной стенкой скважины и внешним корпусом зонда. Под напором обратного тока воды раскрывается "юбка" уплотнителя, "края" которой плотно прижимаются к стенкам скважины и перекрывают поток талой воды. "Юбка" соседнего уплотнителя,

<sup>5</sup>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. С. 137–142.

<sup>6</sup>Зеленчук А.В., Крыленков В.А., Гилева В.Г., Зеленчук В.А., Абакумов Е.В. Устройство для отбора проб компонентов живых систем в ледниковых и подледниковых отложениях. Патент России № 131409 от 25.10.2012.



Эскизный проект использования ТГБ-зонда для исследования толстых льдов и подледниковых озер без нарушения их ледяной изоляции: а – при спуске в толщу льда под давлением гидравлической силы; б – бурение льда вверх под воздействием подъемной силы. Рисунок авторов.

лы. Отличие состоит в том, что сила  $F$  возникает за счет понижения давления на  $\Delta P$  (возникающего перед зондом) путем откачивания насосом талой воды из ледяного забоя. Значение силы  $F$  можно вычислить в соответствии с законом Паскаля; умножая величину перепада давления  $\Delta P$ , создаваемого насосом, на площадь поперечного сечения зонда  $S$ . Например, при величине перепада давления  $\Delta P$  в 10 и 20 атм и диаметре зонда 10 см возникающая гидравлическая сила  $F$  составит около 800 кгс и 1600 кгс, соответственно, что может превысить вес зонда в 20–100 раз. Наибольшей величины давления на ТГБ-зонд гидравлическая сила  $F$  достигает в глубинах, где давление воды  $P$  в скважине превышает перепад давления  $\Delta P$ , создаваемого гидронасосом. При погружении зонда в лед на глубину в несколько десятков метров скорость его движения соизмерима со скоростями обычных термобуров, достигаемыми под воздействием собственного веса. Но на больших глубинах, где

наоборот, складывается и прижимается к корпусу зонда. В результате возникает перепад давления  $\Delta P$  в поперечном сечении  $S$  зонда и сила  $F$ , которая давит на ТГБ-зонд, уменьшая прослойку воды в забое, что увеличивает те-

плоотдачу термоголовки и скорость движения зонда. Предлагаемый принцип движения зонда в ледяной толще (внутри скважины) напоминает движение капсулы в трубе пневмопочты, работающей за счет перепада давления на концах капсу-

величина давления талой воды равна или больше  $\Delta P$  насоса, скорость движения ТГБ-зонда можно повысить в несколько раз путем увеличения мощности как насоса, так и термоголовки.

Для движения к ледовой поверхности включают верхнюю термоголовку, талую воду из ледяного забоя откачивают насосом сквозь зонд в нижнюю часть скважины. Направленная вверх сила  $F$  позволяет эффективно плавить лед, поскольку она многократно превышает вес самого ТГБ-зонда в гравитационном поле. Такая 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 (причем вмерзший в лед кабель выполняет функцию устройства, направляющего движение зонда к ледовой поверхности). Использование для подъема зонда гидравлической тяги вместо троса значительно снижает прочностные требования к самому несущему кабелю,

что позволяет применить компактную энергосберегающую однопроводную систему Тесла для электропитания и телеуправления ТГБ-зондом<sup>7,8,9</sup>.

#### ОСОБЕННОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛЕДЯНЫХ ШИТОВ С ПОМОЩЬЮ ТГБ-ЗОНДОВ

Отметим, что ТГБ-зонды не предназначены для исследования подвижных льдов и ледников с большими трещинами, полостями и рыхлой структурой – с такими исследованиями на Земле вполне справятся обычные термобуры с прочным кабелем, через открытые скважины глубиной до 500 м.

ТГБ-зонды предназначены для исследований малоподвижных толстых льдов и подледниковых сред на глубинах до 5 км на Земле, на Марсе или на спутниках Юпитера и Сатурна (до 40 км), которые могут длиться месяцами, а то и годами.

Для снижения затрат энергии и времени на плавление льда глубинные зонды должны иметь минимально возможную площадь сечения  $S$ , а несущий кабель должен быть достаточно

гибким и прочным, иметь малый вес и минимальные потери энергии во время движения зонда внутри толщи льда.

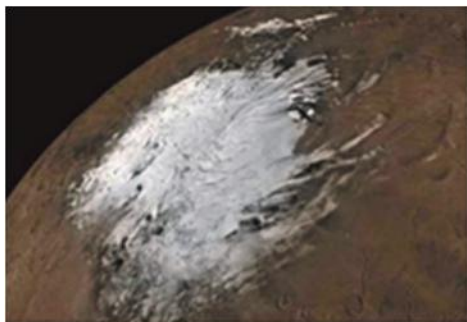
Из-за малых размеров ТГБ-зонда придется свести к минимуму объемы проб талой воды с различных горизонтов ледяной толщи, водной среды и донных отложений озера, которые необходимо доставить в лаборатории для исследований. Традиционный отбор кернов льда целесообразно заменить фильтрацией талой воды из тонких каверн большой площади, размываемых зондом вокруг ледяной скважины. Чем больше площадь размываемой каверны, тем больше плотность оседающих на фильтры 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 их доставку на поверхность для проведения физико-химических и микробиологических анализов в лабораторных условиях.

В выбранной схеме ТГБ-зонда авторами предложено использовать однопро-

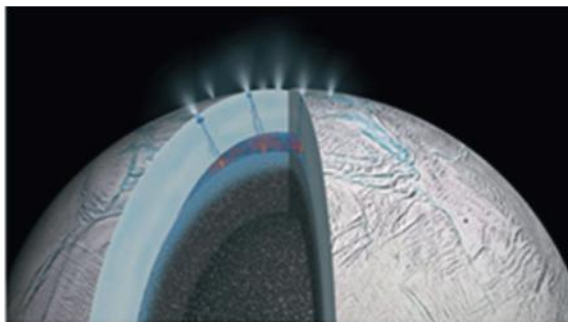
<sup>7</sup>Кадомская К.П., Кандаков С.А., Лебедев Д.М. Об однопроводной системе передачи силовой электрической энергии // Сб. научных трудов НГТУ, 2011. № 2 (64). С. 123–134.

<sup>8</sup>Bank M., Haridim M., Tsingouz V., Ibragimov Z. Highly effective handset antenna // Int'l.J. of Communications, 2012. 6 (2). P. 80–87.

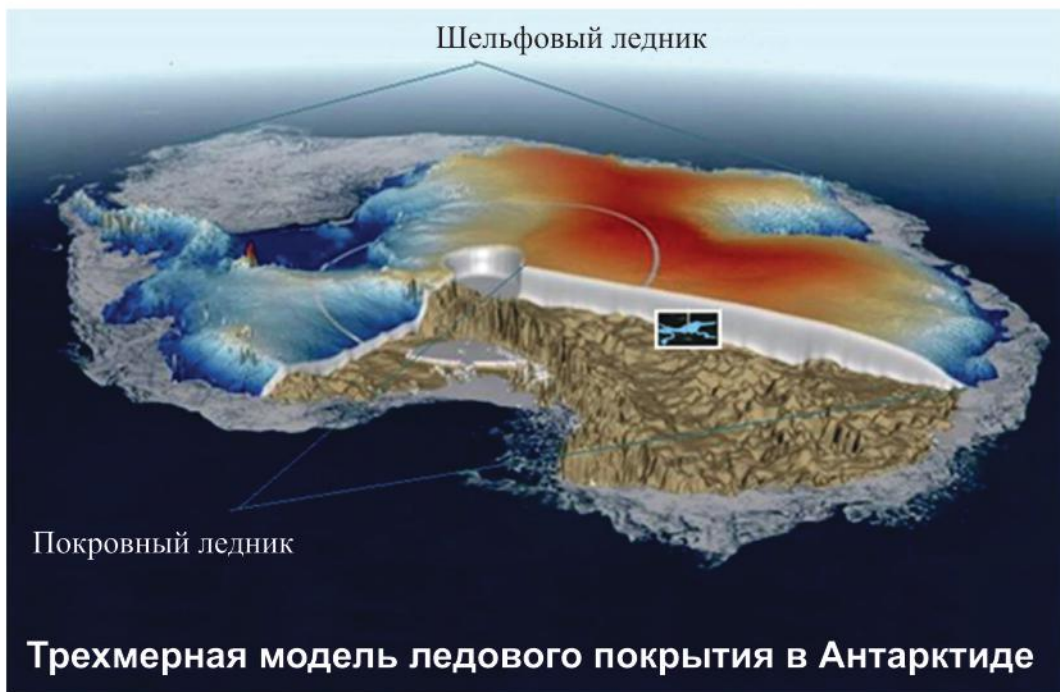
<sup>9</sup>Стребков Д.С., Некрасов А.И. Резонансные методы передачи и применения электрической энергии // Изд. 4-е, перераб. и доп. / М.: ГНУ ВИЭСХ, 2013. 584 с.



а



б



в

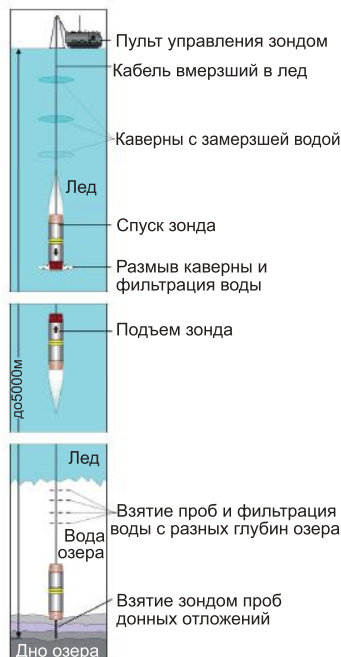
Относительно стабильные ледники, покрывающие поверхность планет и спутников Солнечной системы, – основные объекты исследований с применением ТГБ-криоботов: а – ледяная полярная шапка Марса; б – внутреннее строение спутника Сатурна Энцелада с многочисленными гейзерами, пробивающими ледяную кору; в – строение ледяного щита толщиной 4 км в Антарктиде. Рисунок NASA.

водную систему Tesla – энергоинформационный кабель длиной 5 км, позволяющий уменьшить потери

энергии, вес и габариты катушки с кабелем в несколько раз и не допустить короткого замыкания при его

перекручивании. Компьютер позволит автоматически поддерживать режим резонанса напряжений одно-

Схема герметичного отбора проб талой воды из толщ льда, водной среды озера и донных отложений в подледниковых средах на Земле. Рисунки авторов.



проводного кабеля: "настраивать" собственную частоту резонанса линии при изменении длины кабеля, температуры окружающей среды и других факторов, снижая потери электроэнергии до минимума.

Например, однопроводный стальной несущий кабель диаметром 0,7 мм и длиной 5 км будет весить всего 13 кг, иметь грузоподъемность 50 кгс, что допустимо при малых нагрузках на него. Для уменьшения вероятности обрыва несущего кабеля при извлечении зонда на ледовую поверхность его первые 100 м должны иметь диаметр 1–2 мм, что повысит его грузоподъемность до 100–400 кгс. Термоголовку в виде воронки целесообразно выполнить из четырех независимых секций с насосами – для размыва струями горячей воды каверн в толще льда и зоны ледяного забоя. Это позволит дополнительно увеличить скорость плавления льда за счет турбулентной теплопередачи, а также изменять с помощью разнонаправленных струй воды направление движения зонда при обходе различ-

ных препятствий, встречающихся в ледяной толще (например, камней). Уплотняющие "юбки" могут быть выполнены из силикона или из титана в виде тонких закрылок.

В земных условиях все элементы ТГБ-зонда должны сохранять свою работоспособность при температурах от  $-70^{\circ}\text{C}$  до  $+200^{\circ}\text{C}$ , давлении до 500 атм, а также после периодических жестких стерилизаций автоклавированием, озонированием или под воздействием гамма-облучения.

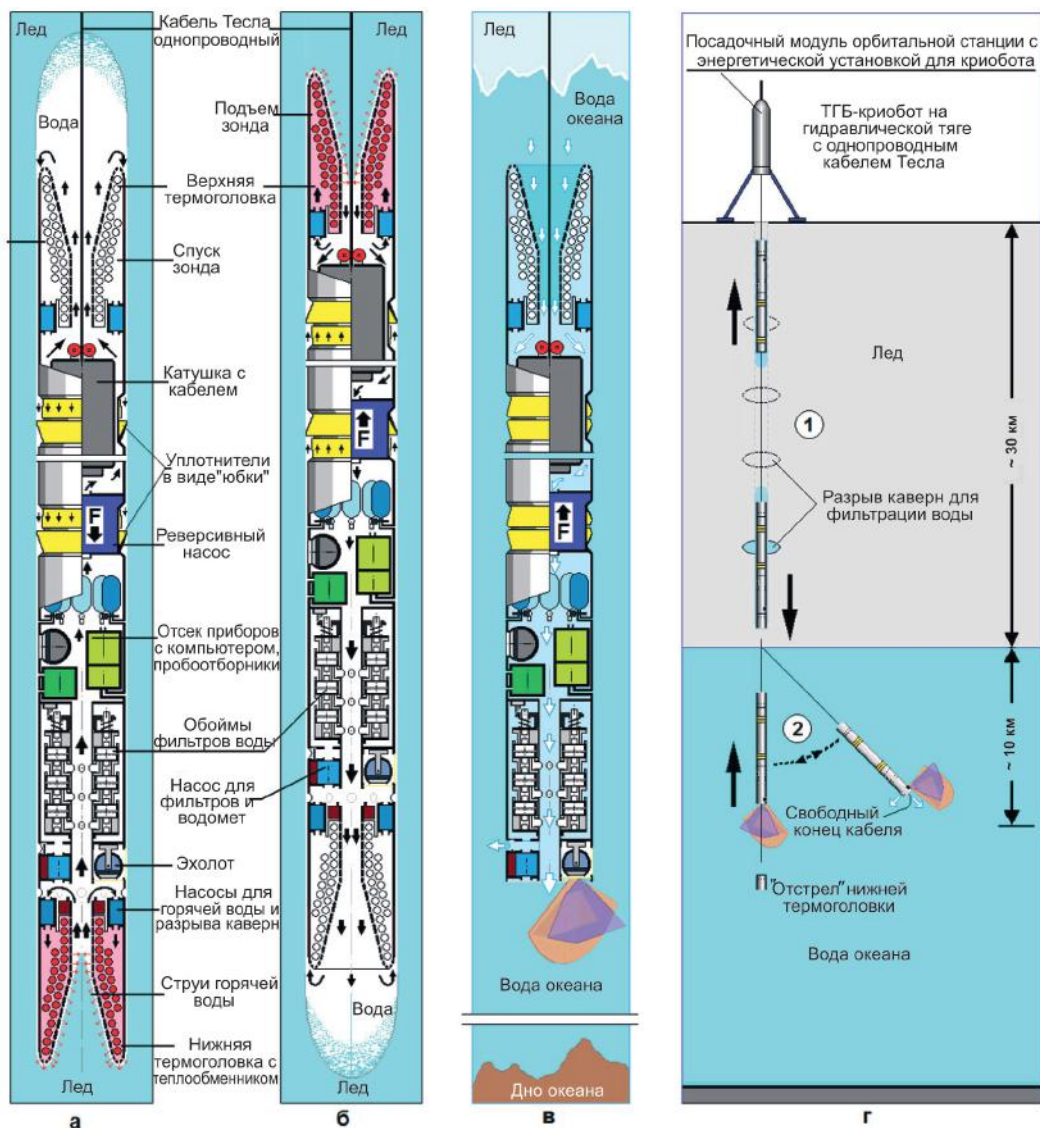
Планируемые параметры ТГБ-зонда для проникновения в толщу льда на Земле на глубину до 5 км: диаметр – 0,1 м, длина – до 4 м, вес – до 20 кг (без кабеля); диаметр однопроводного энергоинформацион-

ного кабеля – от 0,5 до 2 мм, средняя скорость движения – до 10 м/ч при мощности до 10 кВт и температуре льда до  $-60^{\circ}\text{C}$ . Скорость ТГБ-зонда во льду можно повысить до 30 м/ч путем увеличения мощности насоса и термоголовки до 20 кВт.

Возможно оснащение ТГБ-зонда измерительными аналитическими приборами, подобно таковым для зондов типа "RECAS", причем многие конструкции измерительных модулей могут не нуждаться в изолированных отсеках, выдерживающих давление до 500 атм. Например, работа и герметичность фильтрационных устройств определяется малым перепадом, а не абсолютной величиной действующего давления окружающей зонд среды.

Отбор биологических проб на заданном горизонте в ледяной толще осуществляется при неподвижном зонде, при достижении дна озера в нижней термоголовке через заборное отверстие выдвигается пробоотборник донных отложений, затем пробы грунта засасываются в трубы с запорными клапанами на торцах и убираются в кассетницу в корпусе зонда.

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, что ускорит такой же объем исследований в 5–6 раз и позволит организовать системные исследования



Предлагаемый проект ТГБ-крибота для исследования льда на Европе: а – ТГБ-крибот при спуске в толщу льда под давлением силы; б – подъем ТГБ-крибота через толщу льда вверх под действием подъемной силы; в – ТГБ-крибот на спутнике Европа, в океане, после "отстрела" нижней термоголовки; г – этапы работ ТГБ-крибота (1 – его спуск и подъем на гидравлической тяге по несущему кабелю; 2 – спуск в океан, "отстрел" нижней термоголовки, съемка рельефа дна и поверхности раздела льда – вода с помощью торцевого и бокового эхолотов крибота). Рисунок авторов.

криосферы за более короткий период (2–3 месяца) сезонных работ в полярных регионах.

По нашим оценкам, для обслуживания ТГБ-зонда в полевых условиях достаточ-

но бригады из 3–4 специалистов, силовой установки и пульта управления на базе

одного вездехода, что в десятки раз дешевле электро-механического бурения и гидродинамического бурения горячей водой.

#### ПРОЕКТ ТГБ-КРИОБОТА

Для успешной реализации разрабатываемого при поддержке NASA проекта криобота "Валькирия" авторы статьи предлагают воспользоваться принципами, заложенными в эскизном проекте ТГБ-зонда:

- применить 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 автономно, без нагрузки на энергоинформационный кабель;

- использовать однопроводную систему Tesla для передачи энергии криоботу и телеуправления им, что позволит уменьшить вес и габариты кабеля, потери электроэнергии, а также исключит короткое замыкание в кабеле.

Предлагаемая авторами принципиальная конструкция ТГБ-криобота включает в себя: одинаковые воронкообразные термоголовки на торцах корпуса зонда; сквозной канал для протока талой воды и сматывания кабеля с катушки внутри криобота; реверсивный гидронасос внутри и уплотнители –

"юбки" снаружи корпуса зонда. Спуск и подъем такого ТГБ-криобота в толще льда на спутнике Юпитера Европе подобен движению ТГБ-зонда на Земле и схеме проводимых исследований в толще льда: "отстрелив" в водной среде нижнюю термоголовку (она больше не понадобится), зонд может провести батиметрическую съемку рельефа дна океана с помощью торцевого эхолота. Диапазон батиметрических исследований дна и поверхности раздела лед–вода можно значительно расширить, опустив ТГБ-криобот в океан на глубину до 10 км, управляя водометами реверсивного насоса, что позволит "отклонять" зонд на несколько километров от вертикали спуска.

При осуществлении подъема ТГБ-криобота на поверхность Европы не обязательно наматывать кабель на катушку внутри корпуса зонда, а можно выводить его вниз, пропуская сквозь зонд за пределы корпуса. После извлечения ТГБ-криобота с пробами на поверхность на замороженный кабель можно "нанизать" другой криобот для дальнейших исследований льда и подледного океана, но уже без катушки и длинного кабеля. "Облегченный" ТГБ-криобот можно неоднократно перемещать по кабелю вниз и вверх, используя замороженный кабель как направ-

ляющий монорельс, не нарушая ледяной изоляции. Это позволит существенно снизить финансовые и временные затраты на проникновение в толщу льда и, соответственно, увеличить объемы исследований.

#### ПРЕИМУЩЕСТВА ПРОЕКТА ТГБ-КРИОБОТ

ТГБ-криобот может передвигаться как во льду, так и в воде посредством водометных струй (см. выше), что позволит использовать такой зонд для исследования двух сред (льда и воды), то есть он может быть одновременно крио- и гидроботом. Разработку американских специалистов – криобот "Валькирия" – планируют использовать, в основном, для бурения ледяной толщи, а выпуск в водную среду специального гидробота, по мнению авторов, усложняет проект и делает его более затратным.

По сравнению с проектируемым криоботом "Валькирия", предлагаемый авторами настоящей статьи ТГБ-криобот позволит:

- снизить примерно в 10 раз мощность источника питания, который необходимо доставить на ледяную поверхность спутника Юпитера Европе;

- уменьшить диаметр криобота в 2–3 раза и увеличить на порядок скорость бурения льда – до 50 м/ч;

- в несколько раз уменьшить габариты катушки с

кабелем, применив однопроводную систему Тесла; причем в этой энергоинформационной системе 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 проба-

ми на ледяную поверхность Европы, используя гидравлическую силу подъема, силу Архимеда;

– сократить цикл (спуск + подъем) исследований льда и подледного океана на Европе до 4-х месяцев при средней скорости движения криобота – 30 м/ч;

– уменьшить в несколько раз объем и массу криобота, затраты на его доставку к спутнику Юпитера; а также

многократно снизить риски космической миссии и уменьшить стоимость всех работ.

Для реализации проектов создания ТГБ-зондов необходимы заказчики и профессиональные разработчики новых технологий, связанных с изучением ледяных щитов Земли и с получением уникальных знаний о границах распространения жизни и эволюции планет Солнечной системы.

---

## Информация

---

### Сверхпузыри газа вокруг галактик

Астрономы обсерваторий с 10-м телескопами – Кека II (Гавайи) и Большого Канарского – открыли две яркие радиогалактики: TXS0211–122 и TXS 0828+193; они находятся в 11,5 млрд св. лет от нас, в их центрах располо-

жены активные ядра самого высокоэнергетического типа, известного ученым (см. стр. 3 обложки, вверху). Расширяющиеся газовые массивные сверхпузыри вокруг далеких галактик, появление которых, по-видимому, обусловлено "обратной связью", получаемой галактиками от активных ядер, инжектируют большие количества энергии обратно, в родительскую галактику, создавая мощные ветра, которые сметают газ и пыль, лежащие на их пути, и формируют расширяющийся сверхпузырь. Изучение взаимодействия между сверхмассивной черной дырой и

родительской галактикой является ключом к пониманию эволюции наиболее массивных галактик. Ультрафиолетовое излучение, исходящее со стороны аккреционного диска черной дыры, может временно подавить формирование звезд, ионизируя межзвездную среду, а мощные потоки газа в направлении черной дыры могут привести к постоянному подавлению формирования звезд.

*Пресс-релиз  
Обсерватории Мауна-Кеа,  
31 марта 2018 г*



---

## Информация

---

### **"ЭкзоМарс-2020": испытания парашютной системы**

В рамках программы подготовки к запуску АМС по совместной российско-европейской программе "ЭкзоМарс-2020" прошли испытания парашютной системы, с помощью которой планируется обеспечить мягкую посадку на поверхность Красной планеты

российской научной платформы и европейского марсохода. В Кируне (Швеция) с высоты 1,2 км с вертолета был сброшен тестовый имитатор десантного модуля с установленной на нем парашютной системой. После раскрытия вытяжного парашюта был введен в действие основной 35-метровый парашют весом 70 кг (парашютная система в сборке весит 195 кг), он успешно раскрылся при отрицательной температуре воздуха. Весь процесс посадки занял около 2,5 мин. После приземления бортовое оборудование имитатора "направило" телеметрию на станцию слежения в режиме реального времени.

Во время последующих тестов планируется провести испы-

тание всей последовательности работы парашютной системы: раскрыть первый и второй комплекты вытяжного и основного парашютов. Модуль будет сброшен из стратосферного шара с высоты почти в 30 км в условиях низкого атмосферного давления (характерно для атмосферы Марса).

Космический аппарат, который должен будет доставить десантный модуль на Марс, планируется запустить в 2020 г.; посадка на планету ожидается в марте 2021 г. (Земля и Вселенная, 2016, № 3).

*Пресс-релизы ESA  
и ИКИ РАН,  
29 марта 2018 г.*

---

## Информация

---

### **Российский прибор продолжает работу на Марсе**

19 марта 2018 г. российский прибор ДАН на борту марсохода "Кьюриосити" произвел юбилейный, 8-миллионный, импульс глубинного нейтронного зондирования поверхности Марса нейтронами высоких энергий. Исследования состава вещества вдоль трассы движения марсохода проводятся, начиная с августа 2012 г. (Земля и Вселенная, 2012, № 3,

с. 110–112; 2015, № 1, с. 50–51). За это время марсоход прошел около 18,5 км пути на дне кратера Гейл, прибор ДАН провел более 700 сеансов нейтронного зондирования вещества. По данным нейтронных измерений, полученных с помощью прибора ДАН, проведены оценки содержания воды и хлора в марсианском веществе. Эта информация позволяет определить условия формирования дна древнего озера, которое заполняло кратер в древнюю эпоху, и "пролить свет" на процессы его высыхания и эрозии.

Среднее содержание воды в грунте кратера вдоль трассы движения марсохода составляет около 2,6% по массе, при этом оно колеблется примерно от 0,5 до 4%. Это довольно неожиданный результат, поскольку более

ранние исследования орбиты Марса "давали" другую цифру – 4–7%. Среднее содержание хлора в грунте составляет 1,0 %.

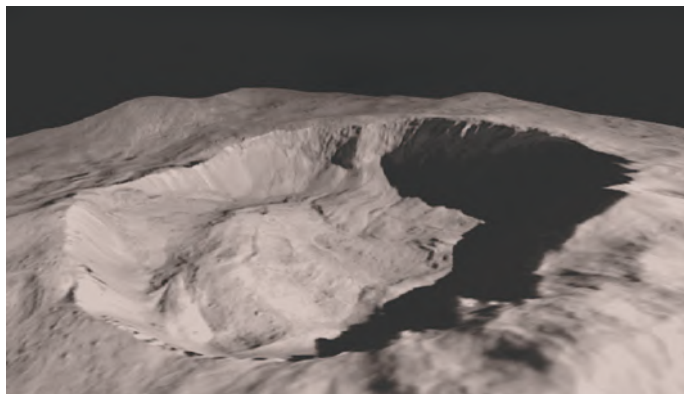
Другой необычный вывод состоит в том, что картина распределения водяного льда в верхнем слое грунта не похожа на ту, что можно было бы наблюдать, например, в пустыне на Земле, где ситуация гораздо более однородна: если воды в определенном месте под поверхностью мало, то вряд ли ее содержание заметно увеличится всего в нескольких метрах от него. Таким образом, предстоит понять, как вода могла отложиться в грунте в форме малых "островов"?

*Пресс-релиз ИКИ РАН,  
19 марта 2018 г.*

### Изменения на Церере

На северной кромке 20-км ударного кратера Juling Цереры зафиксировано увеличение количества водяного льда и обнаружены гидратированные карбонаты, маркирующие области недавнего выхода грунтовых вод. Наблюдения, проводимые с апреля по октябрь 2016 г. с помощью АМС "Доун" ("Dawn"; Земля и Вселенная, 2016, № 3, с. 55; 2017, № 1, с. 96–98; 2017, № 4, с. 54) показали, что эта единственная карликовая планета во внутренней части Солнечной системы остается "активным миром", который и сегодня продолжает меняться и эволюционировать.

Хотя в целом поверхность Цереры – сухая и темная, но картирующий инфракрасный



*На северной кромке кратера Juling, погруженной в вечную тень, обнаружено увеличение количества водяного льда. Снимок получен 30 августа 2016 г. с помощью АМС "Доун". Фото NASA.*

спектрометр VIR на борту станции обнаружил "обнажения" водяного льда в десятках разных мест. Отложения льда в кратере Juling – первая прямая регистрация изменений на поверхности Цереры.

Как рассказал Андреа Рапони из Института астрофизики и планетологии (Рим, Италия), ведущий автор исследования, приближение Цереры к перигелию и наступление "весны" вызвало испарение водяного льда, скрытого нег-

лубоко под поверхностью, и последующую конденсацию водяного пара на холодной, вечно затененной стенке кратера Juling. Образование "свежего" инея увеличило количество водяного льда в этой области; потепление также могло вызвать оползни, "обнажившие" подповерхностный лед.

*Пресс-релиз NASA,  
15 марта 2018 г.*