

# Прикладные проблемы

УДК 551.321

doi: 10.15356/2076-6734-2019-1-123-134

## Зонды для исследования ледяных и подлёдных сред планет

© 2019 г. А.В. Зеленчук, В.А. Крыленков

Научно-техническая фирма «СВИТ», Москва, Россия,  
zelenchuka@rambler.ru

## Probes for the study of icy and subglacial environment of planets

A.V. Zelenchuk, V.A. Krylenkov

LLC «Scientific-Technical Company LVPT», Moscow, Russia  
zelenchuka@rambler.ru*Received January 10, 2018 / Revised June 12, 2018 / Accepted October 16, 2018***Keywords:** *cryobot, Europa – satellite (moon) of the Jupiter planet, hydraulic force, probe, single-wire Tesla system, thermic hydraulic drill (THD).*

### Summary

The article proposes a technology for increasing the thermic ice drilling rate under the influence of hydraulic force generated by the probe (or cryobot), which increases the coefficient of conversion of thermal energy into the energy of ice melting and allows increasing the power of thermal head of the probe. A single-wire Tesla system is proposed to use for the probe power supply, which makes it possible to reduce the volume of the cable and losses of transmitted energy. The method of the probe self-lifting to the ice surface without using the hydraulic force (traction), i.e. without a load on the cable, is proposed. To study thick (up to 5 km) ice sheets and subglacial water environments on the Earth, as well as the ice cover (up to 30 km thick) and the subglacial ocean of the Europe (the Jupiter's satellite), conceptual principal designs of the probe (or cryobot) have been developed on the basis of thermic-hydraulic drilling (THD). Implementation of the THD-cryobot designs will allow organizing systemic studies of glaciers and subglacial water environments on the Earth and other planets, not disturbing their ice isolation with multiple savings of financial and technical means, energy and time.

**Citation:** Zelenchuk A.V., Krylenkov V.A. Probes for the study of icy and subglacial environment of planets. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2019. 59 (1): 123–134. [In Russian]. doi: 10.15356/2076-6734-2019-1-123-134.

*Поступила 10 января 2018 г. / После доработки 12 июня 2018 г. / Принята к печати 16 октября 2018 г.*

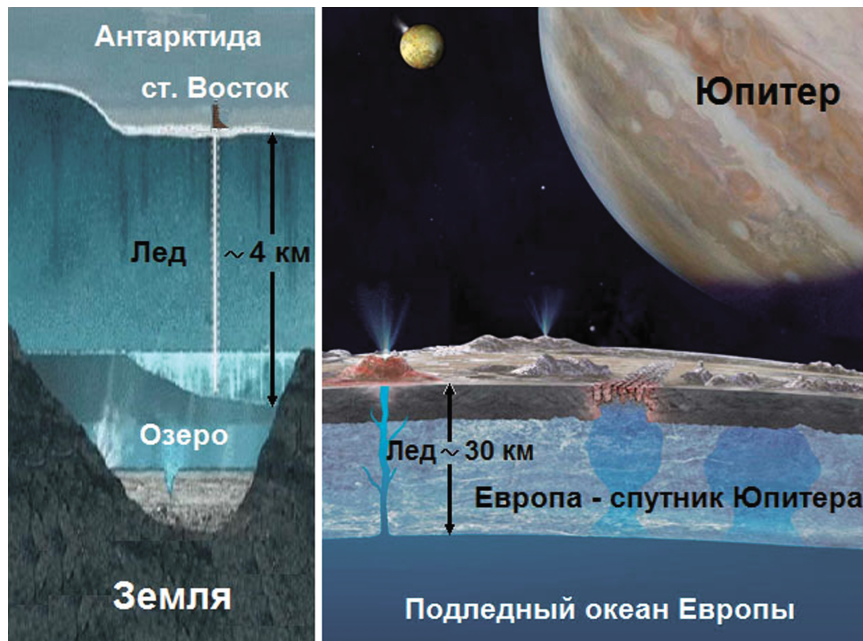
**Ключевые слова:** *гидравлическая сила, Европа – спутник Юпитера, зонд, криобот, однопроводная система Тесла, термогидравлический бур-зонд (ТГБ-зонд).*

Для исследования ледяных массивных щитов (до 5 км) и подледниковых водных сред на Земле, а также ледяного покрова толщиной до 30 км и подлёдного океана Европы (спутника Юпитера) разработан концептуальный проект термогидравлического бура-зонда (ТГБ-зонда и ТГБ-криобота) и представлены ключевые конструкторские решения. Реализация идеи такого зонда (криобота) позволит организовать системные исследования ледников и подледниковых водных сред на Земле и других планетах без нарушения ледяной изоляции при многократной экономии финансовых и технических средств, энергии и времени.

### Введение

Изучение ледяных щитов и подледниковой водной среды Арктики и Антарктики, а также жизнедеятельности микроорганизмов в криогенной среде позволяет получать уникальную информацию об эволюции Земли и жизни на ней [1–4]. Такие исследования необходимы для прогнозирования изменений климата и обеспечения людей знаниями о негативных последствиях быстрого

изменения природной среды нашего обитания на Земле [5, 6]. Изучение подледниковой водной среды (в том числе, подледникового озера Восток в Антарктиде) позволяет учёным обсуждать возможность существования жизни в холодных мирах Солнечной системы (рис. 1), учитывая тот факт, что поверхностные структуры семи из девяти открытых человеком планет, их спутников, а также комет представляют собой криогенные среды. Как полагают специалисты, подобные ус-



**Рис. 1.** Примерная схема разреза толстых льдов и подледниковых сред на Земле и на спутнике Юпитера Европе (рисунок NASA)

**Fig. 1.** The block diagram heavy ice and subglacial environments on Earth and Europa, Jupiter's moon (drawing of NASA)

ловия существуют в подледниковых океанах спутников Юпитера (Ганимед, Каллисто и Европа) и Сатурна (Диона и Энцелад), на полюсах Марса, где концентрация воды в приповерхностном слое на полюсах достигает 90% [7–10]. Жизнеспособные клетки и продукты их жизнедеятельности, обнаруживаемые в криосфере Земли, представляют собой возможный аналог внеземных экосистем. Если жизнь существовала на ранних стадиях развития планет Солнечной системы, то вполне вероятно, что её следы будут сохранены в криогенных зонах и ледяных покровах этих небесных тел.

Создание и использование зондов, не нарушающих естественную ледяную изоляцию холодных экосистем при исследовании мощных (более 1 км) ледниковых щитов, ледников и подледниковой среды, необходимо для системного, регулярного исследования криосферы Земли и других небесных тел. Основные проблемы всех технологий, используемых для проникновения через лёд и изучения ледяной и подлёдной среды, — это нарушение природной ледяной изоляции, низкая скорость бурения (из-за низкого коэффициента преобразования тепловой энергии в энергию плавления льда), большой расход энергии, а также загрязнения (химические и тепловые), присущие существующим технологиям бурения.

По мнению авторов, пришло время для широкого обсуждения идей и технологий, которые ещё либо реализованы не полностью, либо существуют в виде концептуальных проектов. Их интенсивное развитие может привести к появлению автономных и мобильных буровых зондов для изучения ледниковых щитов и криогенных сред на Земле и других небесных телах. Для развития технологий проникновения в толстые ледниковые покровы необходимо организовать апробацию новых идей и конструкций буровых зондов (зондов-буров) с использованием инфраструктуры арктических и антарктических исследовательских станций (см. рис. 1).

### Проблемы исследования мощных ледниковых щитов и подледниковых сред

Получение знаний о геологических, геохимических, гидрологических и микробиологических аспектах криогенной среды (криосферы) имеет большой научный интерес, но требует доступа в ледяной массив и в подледниковую природную среду, развёртывания там научных приборов и извлечения образцов, сохраняя при этом их целостность и не нарушая исследуемой ледниковой

и подледниковой среды. Для защиты этих уникальных ледяных и подледниковых экосистем необходимо предотвращать: а) нарушения режимов термобарического равновесия и фазового перехода на всей поверхности раздела лёд–вода в подледниковых водных средах; б) их загрязнение буровым оборудованием, которое может стать причиной попадания (интродуцирования) загрязняющих микроорганизмов и антропогенных химических веществ в лёд и подледниковую среду в количествах, превышающих фоновые значения. Научным сообществом и финансирующими учреждениями были составлены рекомендации, подобные разработанным для обеспечения защиты планет при выполнении космических миссий, среди которых – необходимость стерилизации зондов перед их проникновением в толщу льда, а также приборов и пробоотборников, предназначенных для спуска в буровые скважины [11–15].

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, необходимо заполнять незамерзающей буровой жидкостью для предотвращения деформации стенок скважины под действием горного давления льда. Буровая токсичная жидкость влияет на чистоту проб, извлекаемых с глубин, а при проникновении в подледниковое озеро может попасть в воду или частично вытесниться озёрной водой в скважину, что зависит от перепада давления на поверхности (границе) раздела лёд–вода. Тем не менее, за 20 лет из глубокой скважины на станции Восток с помощью колонковых буров было получено много кернов льда, изучение которых позволило получить уникальную информацию об изменениях палеоклимата на Земле за сотни тысяч лет.

Проплавление толщи льда горячей водой (Clean Hot Water Drills, CHWD) имеет большую скорость (до 150 м/ч), но эта технология неэффективна из-за больших потерь тепла и необходимости использовать тяжёлое оборудование. Кроме того, такая открытая скважина доступна для изучения подлёдной среды различными приборами не более нескольких десятков часов, пока она не замёрзнет. Поэтому во время бурения необходимо соблюдать весьма сложный режим последовательных и одновременных операций с целью обеспече-

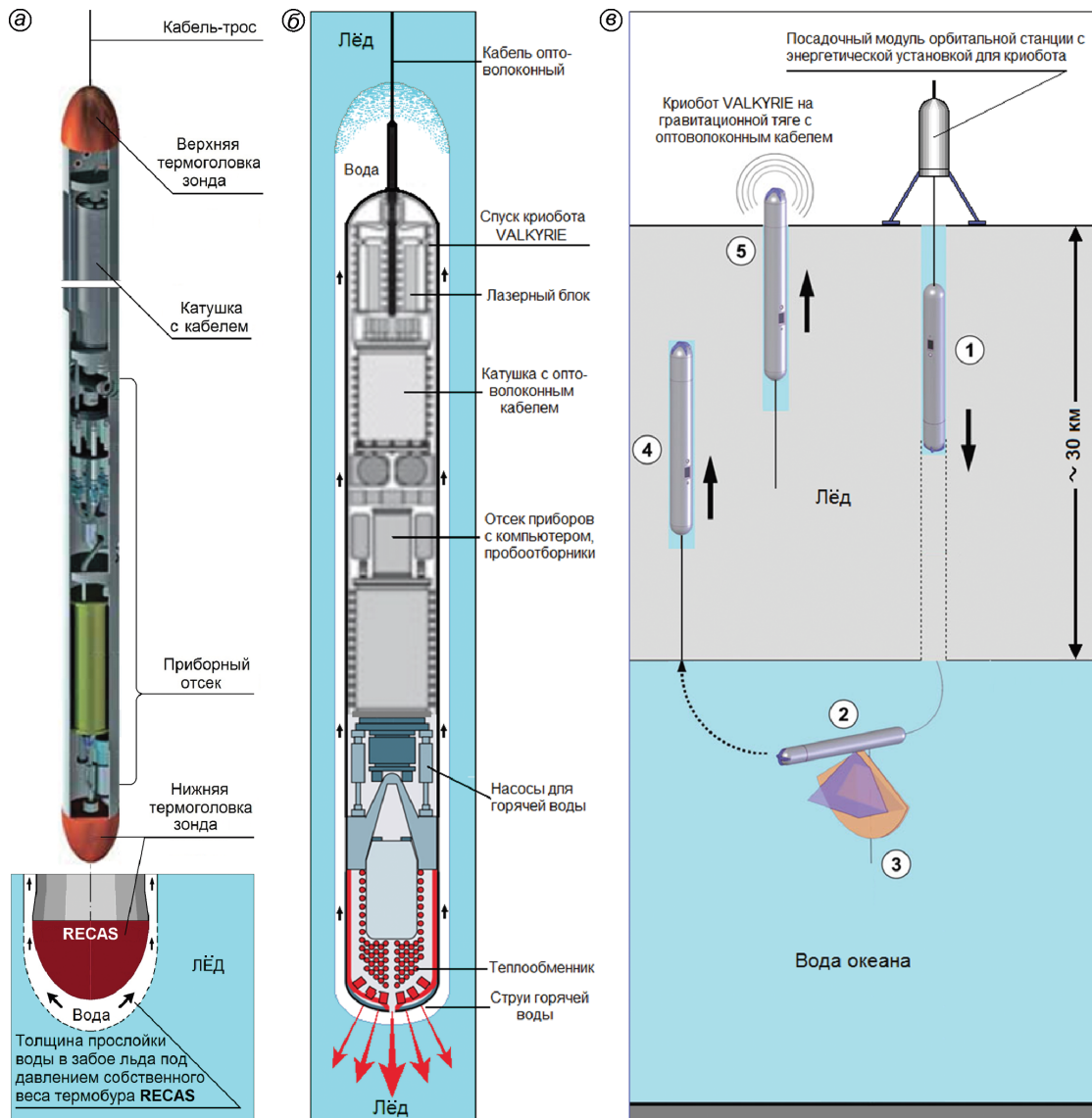
ния процесса бурения и сохранения уже обустроенной скважины [16]. В целях предотвращения замораживания водной среды в скважине, а также замерзания исследовательских приборов, которые могут быстро обледенеть при контакте с водой, в полости ствола скважины необходимо поддерживать температуру около 5 °С (за счёт нагревания и циркуляции водной среды в скважине), что также усложняет применение CHWD-технологии.

Таким образом, применение в труднодоступных полярных регионах Земли крупногабаритных и тяжёлых буровых установок с колонковыми бурами и комплексов гидродинамического бурения горячей водой (сотни тонн оборудования, а энергетические затраты превышают 5 МВт) в целях системных исследований льдов и подледниковых сред весьма нерационально, энергозатратно, чрезвычайно дорого и несёт большие риски загрязнения и нарушения хрупких экосистем криосферы.

В настоящее время безусловно актуален поиск новых идей при конструировании мобильных и автономных зондов для герметичного проникновения в ледяные массивы и подледниковые среды. Их создание позволило бы организовать систематические и вместе с тем сравнительно малозатратные исследования криосферных сред в труднодоступных полярных регионах Земли, ледяных массивов и водных сред других планет Солнечной системы при минимальном риске их загрязнения и нарушения. Поэтому авторы статьи уделили особое внимание анализу свойств некоторых конструкций мобильных, автономных и сравнительно малогабаритных зондов, описания которых в виде концептуальных проектов появились в различных публикациях последних лет.

#### **Проекты зондов для герметичного проникновения в подледниковые среды**

Командой Р.Г. Талалая (2014 г.) для герметичного проникновения в массивные льды (ледниковые щиты) и подледниковые озёра на Земле был предложен зонд-термобур RECAS (Recoverable autonomous sonde – извлекаемый автономный зонд), использующий принцип термического бурения льда, оснащённый двумя термоголовками на торцах его корпуса, внутри которого размещены приборный отсек и катушка с несущим кабелем, соединённым с электро-



**Рис. 2.** Концептуальные проекты зондов RECAS (а) и VALKYRIE (б) для исследования ледниковых щитов и подледниковых сред на Земле и других планетах.

Этапы миссии крибота VALKYRIE на Европе – спутнике Юпитера (в): 1 – бурение-спуск через лёд; 2 – поворот в воде и перемещение в радиусе 1 км подо льдом; 3 – съёмки рельефа дна боковым эхолотом; 4 – поворот в воде и подъём сквозь лёд; 5 – выход на ледяную поверхность небесного тела

**Fig. 2.** Conceptual designs of RECAS (a) and VALKYRIE (b) probes for the study of ice sheets and subglacial environments on the Earth and other planets.

The stages (position) of the VALKYRIE cryobot mission on Europe – the satellite of Jupiter (в): 1 – launch through the ice; 2 – turn in water and sailing over 1 km under the ice; 3 – surveys of seabed relief by side echo-sounder; 4 – turn in water and lift through ice; 5 – exit to the ice surface

генератором и пультом управления на ледяной поверхности (рис. 2, а) [17]. Когда нижняя термоголовка плавит лёд, RECAS движется вниз под действием собственной силы тяжести, а несущий кабель разматывается с катушки, размещённой внутри корпуса зонда, и выходит через небольшое центральное отверстие в верхней термого-

ловке. Талая вода в скважине выше зонда быстро замерзает, охватывая неподвижный относительно массива льда кабель и обеспечивая тем самым ледяную изоляцию зонда и подледниковой среды от поверхности. Такой зонд движется сквозь лёд внутри герметичного ледяного «кокона», заполненного талой водой из ледяного забоя.

Для обеспечения подъёма зонда на поверхность верхняя термоголовка плавит лёд, а кабель с усилием, создаваемым электромеханическим приводом, наматывают на катушку внутри зонда. Таким образом, сила давления зонда в верхний ледяной забой при подъёме определяется силой натяжения кабеля, а талая вода в скважине ниже зонда быстро замерзает. По оценкам команды Талалая, RECAS весом 5000 Н, диаметром 150 мм и длиной 4 м, оснащённый электрогенератором мощностью 9–10 кВт, способен развить скорость бурения во льду до 1,7 м/ч, что обеспечит цикл исследований в массиве льда на глубинах до 5 км длительностью не более 8–9 месяцев при небольшом штате обслуживающего персонала (4–5 человек) и затратах топлива порядка 12 т, что в 10–20 раз дешевле, чем применение электромеханического бурения или проплавления льда струёй горячей воды. При этом RECAS обеспечит целостность естественной ледяной изоляции подледниковой среды при отборе проб талой воды во льду и подледниковой водной среды озера. Однако сроки миссии RECAS не укладываются в тёплый период сезонных работ в Арктике и Антарктике (2–3 месяца), а большая механическая нагрузка на несущий кабель может привести к его обрыву при подъёме этого зонда.

Примерно такой же принцип конструирования зонда был предложен командой W.C. Stone (2014 г.) из США при концептуальном проектировании крибота VALKYRIE для исследований толстого (до 30 км) ледникового покрова и подледного океана Европы, луны Юпитера [18]. В этом криботе термоголовка оснащена соплами, испускающими в ледяной забой струи горячей воды, т.е. применяется комбинация термобурения проплавлением льда и гидродинамического бурения горячей водой. Предполагается также, что крибот будет потреблять энергию через лазер мощностью до 250 кВт от источника с ядерным топливом, расположенным на ледяной поверхности спутника Юпитера. Для подвода энергии лазера к криботу специалисты из США предполагают использовать оптическое волокно толщиной в несколько микронов. Причём такой энергоинформационный кабель будет намотан на катушку, размещённую внутри корпуса крибота, и будет разматываться по мере спуска крибота в ледяной массив. Талая вода, образовавшаяся при термическом бурении, быстро замёрзнет выше корпуса крибота, вмо-раживая, таким образом, в скважину, энергоин-

формационный кабель, соединяющий крибот с источником энергии на поверхности. При испытаниях на Аляске в 2015 г. макет такого крибота (длина 1,6 м, диаметр 0,45 м и мощность 5 кВт) пробурил лёд на глубину 30 м при скорости бурения примерно 1 м/ч [19]. В ледяном массиве на луне Европа, где гравитация (тяготение) на порядок меньше, чем на Земле, крибот будет бурить лёд горячей водой, прижимаясь к забою с силой в 10 раз меньшей, чем на Земле. Бурение-проплавление льда под действием такой небольшой силы и малой скорости бурения скважины (около 1 м/ч) может привести к большим потерям тепла (до 90%) через боковые поверхности скважины. Отметим, что для бурения льда толщиной в 30 км может потребоваться более четырёх лет. Достигнув подледного океана и проплыв в нём около 1 км, крибот VALKYRIE должен изменить своё положение в пространстве водной среды и плавучесть (как подводная лодка), чтобы под действием выталкивающей (подъёмной) силы Архимеда подниматься к ледяной поверхности, как показано на рис. 2, в.

Основным недостатком термобуров типа RECAS и крибота VALKYRIE, проплавливающих толщу льда с силой тяжести (определяемой гравитационным полем Земли или другого небесного тела), т.е. под воздействием гравитационной тяги, является малая скорость бурения из-за большого термического сопротивления водяной прослойки в забое между льдом и термоголовкой, которое пропорционально толщине этой прослойки (см. рис. 2, а, внизу). Простое повышение мощности термоголовки для увеличения скорости бурения льда может привести к парообразованию и увеличению толщины прослойки талой воды, что снижает теплоотдачу в ледяной забой, а термоголовка может перегореть. Поэтому для безопасного увеличения мощности термоголовки и скорости бурения необходимо повысить теплоотдачу термоголовки в лёд через прослойку талой воды, например, уменьшив её толщину путём воздействия дополнительной силой на зонд в направлении его движения.

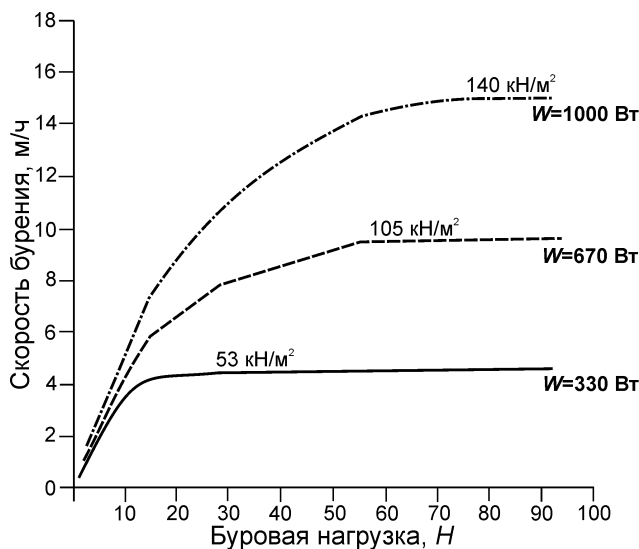
В тяжёлых зондах RECAS и VALKYRIE при их движении вниз такой силой служит их собственный вес (определяемый притяжением Земли как сила тяжести, равная примерно 5000 Н для каждого из этих зондов), что обеспечивает удельную нагрузку на забой, выше которой скорость движения зондов во льду не изменяется, т.е. стабилизируется («выходит на «плато») и остаётся максимальной

при неизменной мощности термоголовок. Например, для RECAS на малых глубинах в массиве льда эти условия выполняются, поскольку начальный вес — сила тяжести зонда — достаточно большая (примерно 5000 Н). Однако по мере погружения зонда в ледяной массив значительная масса кабеля вмёрзнет в лёд, и на глубинах 3–4 км вес зонда и удельная нагрузка становятся в разы меньше, а скорость движения зонда будет стремиться к нулю при неизменной мощности его термоголовки. При движении к поверхности ледяного массива роль подъёмной силы, вдавливающей верхнюю термоголовку RECAS в ледяной забой, выполняет сила натяжения кабеля, который наматывается при помощи механического привода на катушку внутри зонда. При этом для обеспечения необходимой удельной нагрузки термоголовки на ледяной забой при движении зонда вверх грузоподъёмность кабеля должна быть, как минимум, вдвое больше веса самого RECAS с кабелем (т.е. более 10 000 Н), что приводит к значительному увеличению веса, габаритов, энергозатрат и времени миссии подобных зондов на больших глубинах в ледяном массиве.

Эти принципиальные недостатки конструкций термобуров-зондов, основанных на бурении проплавлением ледяного массива под действием гравитационной силы (тяги), исправить невозможно, если не изменить принципиально природу силы, воздействующей на термобуры-зонды в направлении их движения. Именно поэтому концептуальные проекты RECAS и VALKYRIE не имеют перспектив применения для исследования ледниковых щитов даже на Земле.

### Принципы термогидравлического скоростного бурения льдов

В качестве альтернативы авторы настоящей статьи предлагают создать на порядок более лёгкие, чем RECAS и криобот VALKYRIE, зонды, *но которые способны* (в этом принципиальное отличие) *самостоятельно генерировать некую силу по направлению движения зонда*, обеспечивая необходимые удельные нагрузки на забой льда вне зависимости от гравитации на Земле и других небесных телах [4]. С целью безопасного увеличения мощности термоголовки (и скорости движения) термобура предлагается снизить термическое сопротивление прослойки талой воды в забое льда,



**Рис. 3.** Зависимость скорости бурения-проплавления льда от мощности и осевой нагрузки макета-прототипа при температуре льда  $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Параметры макета: диаметр — 27 мм, длина — 350 мм, мощность — до 1 кВт, вес — 8 Н (вес в воде — 5,6 Н)

**Fig. 3.** Dependence of the drilling-penetration rate of ice on the power and axial load of the prototype at ice temperature of  $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Parameters of the prototype (model): diameter — 27 mm, length — 350 mm, power — up to 1 kW, weight (gravity force) — 8 N (weight in water (gravity force) — 5.6 N)

уменьшая её толщину путём воздействия дополнительной силой на термобур. Это легко сделать на поверхности в зоне досягаемости и доступности зонда-термобура. На рис. 3 показана зависимость скорости бурения от мощности термоголовки и осевой нагрузки макета ТГБ-зонда при температуре льда  $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ . При малом весе зонда для достижения максимальной скорости бурения (достижения «плато») необходимо (как видно на рис. 3) увеличить мощность термоголовки и давление зонда на дно ствола скважины в 5–13 раз.

По нашим оценкам, уровни удельной нагрузки и «плато самой высокой скорости бурения» будут пропорциональны мощности тепловой головки зонда. Теоретически это позволит лёгкому зонду двигаться в ледяном массиве на любых глубинах и в любых направлениях с максимальной скоростью (вплоть до 150 м/ч, как при плавлении льда под давлением струи горячей воды) и с минимальной нагрузкой на энергоинформационный несущий кабель в ледяных массивах планет, имеющих разную гравитацию. Для авторов основная задача заключалась в том, как на больших

глубинах, недостижимых для прямого воздействия на термобур с поверхности льда, научиться генерировать некую силу по направлению движения зонда? Авторы предложили воздействовать на зонд гидравлической силой, создаваемой самим термобуром за счёт перепада давления воды на торцах цилиндрического корпуса зонда.

### Принципиальная конструкция ТГБ-зонда для исследования льдов

Предлагаемый авторами концептуальный проект термобура-зонда основан на генерировании гидравлической силы, которая создаётся самим зондом за счёт перепада давления воды на обоих торцах его корпуса. Термический гидравлический буровой зонд (ТГБ-зонд) для исследования мощных массивов льдов и подлёдных водных сред представлен на рис. 4, а, б. На верхнем и нижнем торцах трубчатого корпуса ТГБ-зонда установлены термоголовки в виде воронок с каналами, предназначенными для перекачки талой воды сквозь зонд. Внутри корпуса находятся реверсивный гидравлический насос и привод катушки с намотанным на неё несущим кабелем, который, разматываясь, выходит через отверстие в верхней термоголовке за пределы зонда. Над нижней термоголовкой размещён приборный отсек зонда с приводами для взятия проб воды и донного грунта. Для передачи энергии и информации предусмотрен контактный или бесконтактный токосъём с энергоинформационного несущего кабеля. В углублениях по периметру внешнего корпуса ТГБ-зонда установлены пары разнонаправленных уплотнителей в виде «юбок».

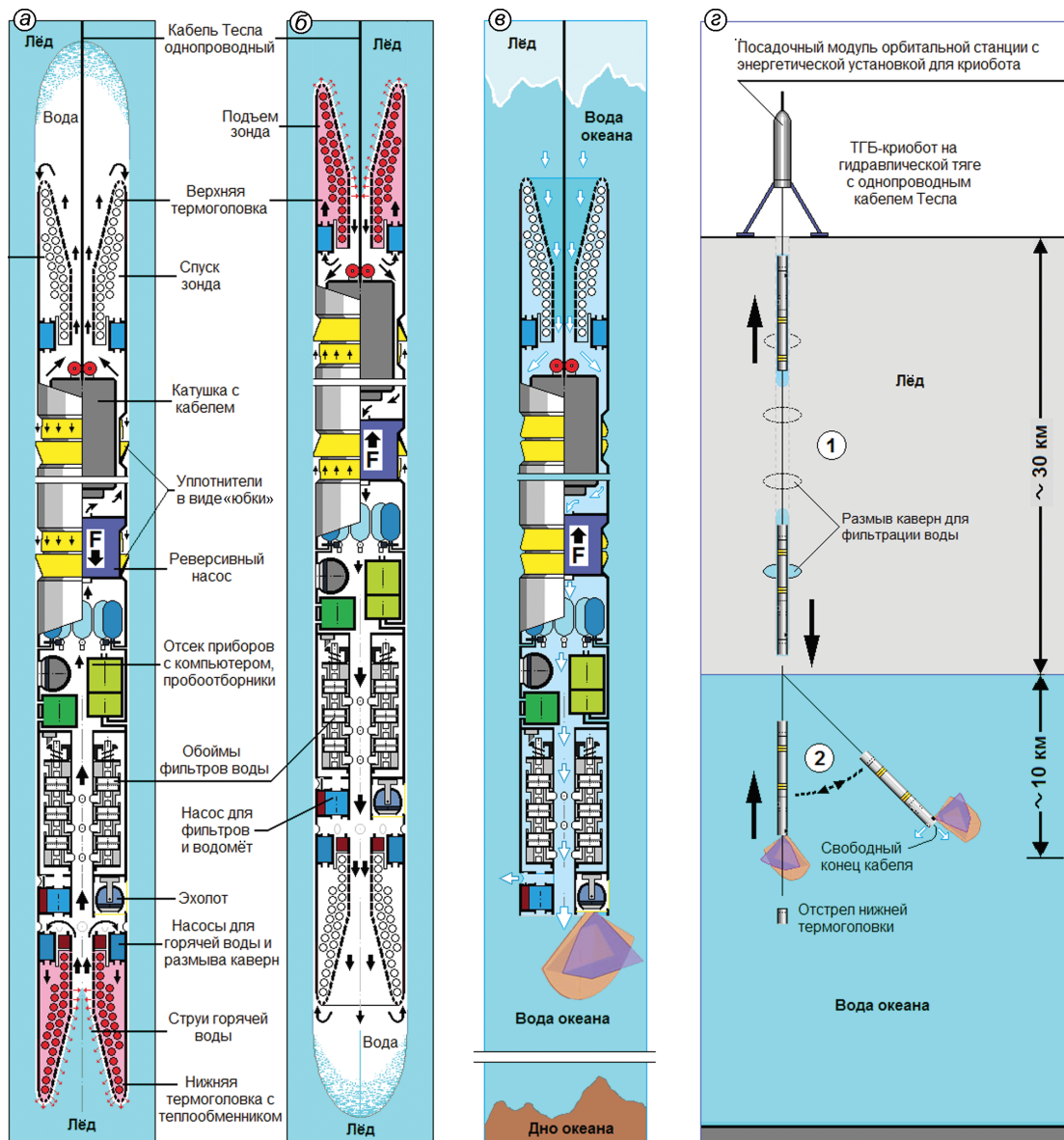
Когда ТГБ-зонд движется вниз, включён нагрев нижней термоголовки, а из ледяного забоя талая вода откачивается гидравлическим насосом сквозь зонд в верхнюю (над корпусом зонда) часть скважины. В зоне ледяного забоя создаётся разрежение, под действием которого возникает обратный ток талой воды через зазор между стенкой скважины и внешним корпусом зонда. Под действием обратного тока воды раскрывается «юбка» уплотнителя, края которой плотно прижимаются к стенкам скважины и перекрывают обратный ток воды. «Юбка» соседнего уплотнителя, наоборот, складывается и прижимается к стенке зонда (см. рис. 4, а). В результате возникают перепад давле-

ния  $\Delta P$  в поперечном сечении зонда  $S$  и сила  $F$ , которая давит на ТГБ-зонд, уменьшая прослойку воды в ледяном забое, что увеличивает теплоотдачу термоголовки и скорость движения зонда.

Предлагаемый принцип движения зонда во льду (внутри скважины-«коккона», см. рис. 4, а, б) похож на движение капсулы в трубе пневмопочты, обеспечиваемое за счёт перепада давления на концах капсулы. Отличие состоит в том, что сила  $F$  возникает за счёт понижения давления на  $\Delta P$  перед зондом при откачивании насосом талой воды из ледяного забоя. Значение силы  $F$  можно вычислить в соответствии с законом Паскаля, умножив величину перепада давления  $\Delta P$ , создаваемого насосом, на площадь поперечного сечения зонда  $S$ . Например, при величине  $\Delta P$  в 10 и 20 атмосфер и диаметре зонда 10 см гидравлическая сила  $F$  будет равна соответственно около 8000 и 16 000 Н, превысив собственный вес (силу тяжести) зонда в 20–100 раз. Наибольшей величины воздействия на ТГБ-зонд гидравлическая сила  $F$  достигнет в глубинах ледяного массива, где давление талой воды в скважине  $P$  превысит перепад давления  $\Delta P$ , создаваемый гидравлическим насосом.

Двигаясь в ледяном массиве *вниз* внутри «коккона» с талой водой, зонд прижимается по направлению движения к ледяному забою под действием «гидравлической силы». На границе лёд–вода озера (или подлёдного океана луны Европа) зонд выходит из режима движения в «коконе» (когда нарушается «цилиндричность» скважины и «юбки» перестают выполнять роль уплотнителей) и выталкивается в водную среду реактивной (водомётной) силой (тягой) гидравлического насоса. Далее в воде озера зонд перемещается вниз не только под действием силы тяжести, создаваемой собственным весом, но и за счёт тяги, создаваемой струёй гидравлического насоса-водомёта (своего рода водомётный движитель). Если вес зонда в воде близок к выталкивающей (подъёмной) силе Архимеда, то управлять перемещениями такого зонда в воде можно направленной струёй гидравлического (водомётного) насоса с минимальными механическими нагрузками на несущий трос-кабель.

При подъёме на поверхность, на границе вода–лёд зонд будет вдавливаться в лёд за счёт реактивной тяги, создаваемой струёй, направленной в сторону водной среды, и одновременно «подтягиваться» на несущем тросе, наматываемом на катушку, размещённую внутри корпуса



**Рис. 4.** Концептуальный проект термогидравлического бура-зонда (ТГБ-зонда) для исследования мощных ледниковых щитов и подледниковых водных сред без нарушения их ледяной изоляции:

*a* – ТГБ-зонд при спуске в толщу льда под давлением гидравлической силы  $F$ ; *b* – бурение ТГБ-зондом льда вверх под воздействием подъёмной силы  $F$ ; *в* – ТГБ-крибот в воде подледного океана спутника Юпитера Европы; *г* – предполагаемая общая схема движения ТГБ-крибота и отбора проб при его движении через лёд и в водной среде океана Европы или в подледниковом озере на Земле; 1, 2 – см. рис. 2

**Fig. 4.** The conceptual design of a thermohydraulic drilling probe (THD cryobot) for the study of heavy ice sheets and subglacial water environments for the exploration of Jupiter's moon Europa without disturbing their icy insulation: *a* – author's THD-cryobot at ice drilling downward under the pressure of force  $F$ ; *b* – lift of the THD-cryobot upward in ice under the action of the buoyancy force  $F$ ; *в* – THD-cryobot in water of the Europa's ocean after jettisoning of the lower thermal head; *г* – operating stage (position) of the THD-cryobot; 1, 2 – see Fig. 2

ТГБ-зонда. Это будет продолжаться до тех пор, пока во льду не сформируется ствол скважины, в котором «юбка» опять начнёт выполнять роль уплотнителя и режим «реактивной» тяги перейдёт в режим «гидравлической» тяги. Далее, до ледя-

ной поверхности ТГБ-зонд будет двигаться внутри кокона с талой водой, используя, в основном, гидравлическую силу, и только непосредственно перед подъёмом на поверхность будет использовать реактивную тягу и «подтягивание» на тросе.



Именно поэтому диаметр последних десятков метров троса необходимо увеличить до 2–3 мм, что повысит грузоподъемность троса до 4000–10 000 Н и уменьшит вероятность обрыва троса-кабеля.

Именно гидравлическая тяга, позволяющая ТГБ-зонду самостоятельно подниматься на ледяную поверхность, снижает прочностные требования к несущему кабелю, что позволяет применить компактную однопроводную энергосберегающую систему Тесла для безопасного электропитания и телеуправления ТГБ-зонда [20–23]. Применение гидравлической силы (тяги) – принципиальное отличие от зондов типа RECAS и VALKYRIE. Эта сила позволит ТГБ-зонду двигаться во льду на любых глубинах и в любых направлениях с максимальной скоростью и с минимальной нагрузкой на несущий кабель на небесных телах, имеющих разную гравитацию.

Разработка этого концептуального проекта окажет влияние на другие технические проблемы, которые ждут своего решения. Следует перечислить некоторые из них: а) уменьшение поперечного сечения зондов для снижения энергозатрат на проплавление ледяного массива; б) подача электроэнергии на зонд с минимальными потерями; в) подъём зонда на поверхность без риска разрушения (обрыва) кабеля; г) стабилизация и контроль движения зонда в ледяном массиве и в подледниковой среде; д) устройства отбора проб льда, воды и грунта при очень высоких давлениях окружающей среды.

Отметим, что ТГБ-зонды не предназначены для исследования подвижных льдов и ледников с большими трещинами, полостями и рыхлой структурой. Они могут использоваться для долговременных исследований малоподвижных мощных льдов (ледниковых щитов) и подледниковых сред на глубинах до 5 км на Земле или до 40 км на спутниках Юпитера и Сатурна. В целях снижения затрат энергии и времени на плавление льда зонды должны иметь минимально возможную площадь сечения  $S$ . В качестве энергоинформационного кабеля длиной 5 км в конструкции ТГБ-зонда на гидравлической тяге мы предложили 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. Например, однопроводный несущий кабель-трос диаметром 1 мм и длиной 5 км поместится на катушке длиной 100 см

при её диаметре 8 см и будет весить 250 Н, имея грузоподъемность 1000 Н, что вполне достаточно для малых механических нагрузок.

Для передаваемой мощности 20 кВт эффективная плотность тока в подобном проводнике достигает 600 А/мм<sup>2</sup>, а удельная электрическая мощность – 4 МВт/мм<sup>2</sup>, что более чем достаточно. Снимать энергию и информацию с проводника можно контактно или бесконтактно специальным роликовым блоком внутри зонда. Компьютер позволит автоматически поддерживать режим резонанса напряжений однопроводного кабеля-троса, т.е. настраивать собственную частоту резонанса линии при изменении длины кабеля, температуры окружающей среды и других факторов, обеспечивая минимальные потери энергии [20–23].

Основные материалы, применяемые в конструкции зонда (титан, силикон) должны сохранять свою работоспособность при температуре от –70 до +200 °С и давлениях до 50 МПа после их стерилизации автоклавированием, озонированием и гамма-облучением. Уплотняющие «юбки» могут быть выполнены из силикона или в виде тонких закрылок из титана. Планируются следующие параметры ТГБ-зонда для проникновения в лёд до глубин около 5 км: диаметр – до 10 см, длина – до 4 м; вес (сила тяжести) – до 300 Н без кабеля; средний диаметр однопроводного энергоинформационного троса – 1 мм; общая мощность зонда – 10 кВт; средняя скорость движения – 10 м/ч при мощности термоголовки 5 кВт и температуре льда до –60 °С.

Скорость движения ТГБ-зонда в ледяном массиве можно повышать, увеличивая мощность гидравлического насоса и термоголовки. Например, при общей мощности зонда 20 кВт скорость его движения можно повысить до 30 м/ч (при мощности термоголовки 13–15 кВт). Отметим, что однопроводная система Тесла в виде троса диаметром 1 мм потенциально позволит передать более 3000 кВт электрической мощности на десятки километров с эффективностью 96–97%, причём для обеспечения работоспособности ТГБ-зонда достаточно всего 10–20 кВт. Эксплуатация ТГБ-зонда на ледниковых щитах Земли толщиной до 5 км потребует в 5–6 раз меньше топлива (по сравнению с RECAS при одинаковой мощности в 10 кВт) и обеспечит сходный объём исследований в 5–6 раз быстрее (длительность – до 50 суток). Это позволит организовать системные исследования криос-

феры за короткий тёплый полярный сезон на базе всего одного вездехода с небольшим коллективом обслуживания, экономя при этом материальные, финансовые и трудовые затраты.

В настоящее время соотношение научная задача/стоимость проекта выше у установок бурения льда с отбором кернов, а разработка проекта ТГБ-зонда пока требует серьёзных финансовых и материально-технических вложений. Однако далее применять в труднодоступных полярных регионах Земли громоздкие буровые установки с колонковыми бурами и комплексы с горячей водой для системных исследований льдов и подледниковых сред не только опасно для изолированных и хрупких полярных и подледниковых экосистем, но и нерационально — чрезвычайно дорого и долго. Используя автономные и мобильные ТГБ-зонды, можно в десятки раз дешевле, быстрее и точнее определить наиболее перспективные места для дальнейших детальных исследований льдов или поиска подо льдом месторождений полезных ископаемых в труднодоступных полярных регионах Земли и в других небесных телах Солнечной системы.

#### **Возможности ТГБ-криобота для исследования ледникового щита и подлёдного океана Европы — спутника Юпитера по сравнению с криоботом VALKYRIE**

Спуск (см. рис. 4, а, з) и подъём (см. рис. 4, б, з) ТГБ-криобота в толще льда Европы (спутника Юпитера) подобен движению и миссии ТГБ-зонда в толще льда и в подледниковой водной среде на Земле [4]. Отстрелив в водной среде нижнюю термоголовку (она больше не нужна), зонд выполнит батиметрическую съёмку рельефа дна океана торцевым эхолотом (см. рис. 4, з). Диапазон батиметрических исследований дна и поверхности раздела лёд—вода можно значительно увеличить, опустив ТГБ-криобот в океан на глубину до 10 км, и, управляя струями, выпускаемыми реверсивным гидравлическим насосом, можно отклонять зонд на несколько километров от вертикали спуска (как показано на рис. 4, з). Следовательно, ТГБ-криобот может двигаться как во льду, так и в воде и, соответственно, способен выполнять свою миссию в этих двух средах — то есть, быть криогидроботом. Криобот VALKYRIE американские специалисты предусматривают использовать

в ледяном массиве (см. рис. 2, в), а для исследования подлёдной водной среды (океана Европы) выпустить из криобота специальный гидробот, что, по нашему мнению, усложнит и удорожит этот концептуальный проект. Отметим, что подобную схему миссии ТГБ-криобота можно применять и для исследований подледникового озера Восток в Центральной Антарктиде [4, 23].

При подъёме ТГБ-криобота на поверхность ледникового щита Земли или на ледяной покров Европы не обязательно наматывать кабель на катушку внутри корпуса зонда, а можно вывести этот несущий кабель с помощью специального привода за пределы корпуса, пропуская его сквозь зонд свободным концом. После извлечения ТГБ-криобота с пробами на поверхность на замороженный в лёд кабель можно «нанизать» другой криобот для дальнейших детальных исследований льда и подлёдного океана, но уже без громоздкой катушки с кабелем. Снимая энергию и информацию контактно или бесконтактно специальным роликовым блоком, такой «облегчённый» зонд можно неоднократно перемещать по замороженному в лёд кабелю вниз и вверх, используя его как направляющий рельс, причём без нарушения ледяной изоляции, что позволит существенно снизить финансовые и временные затраты на проникновение в толщу льда и увеличить объёмы исследований.

Предлагаемый нами ТГБ-криобот (по сравнению с проектируемым «Stone Aerospace» и финансируемым NASA (США) криоботом VALKYRIE) позволит выполнить следующее:

1) примерно в 10 раз снизить мощность источника питания, который необходимо доставить на ледяную поверхность луны Европа;

2) уменьшить диаметр зонда в 2–3 раза и увеличить скорость его движения до 50 м/ч (практически на порядок);

3) в несколько раз уменьшить диаметр катушки с кабелем, применив однопроводную систему Тесла, поскольку в ней минимальны ограничения по радиусу изгиба однопроводного кабеля и пределу передаваемой мощности, а также исключены короткие замыкания, причём потери энергии в режиме резонанса напряжений ничтожно малы;

4) значительно ускорить возврат криобота с пробами на ледяную поверхность с помощью гидравлической силы подъёма, которая может на два порядка (до 100 раз) превысить подъёмную (гравитационную) силу Архимеда;

5) сократить цикл (спуск + подъём) исследований ледникового щита и подледниковой среды на Земле до 1–2 месяцев при средней скорости движения криобота 10 м/ч;

6) сократить цикл (спуск + подъём) исследований ледникового покрова и подлёдного океана Европы с восьми лет до четырёх месяцев при средней скорости движения криобота 30 м/ч;

7) уменьшить в несколько раз объём и вес криобота, затраты на его доставку к спутнику

Юпитера при многократном снижении рисков его исследовательской миссии и стоимости всех сопутствующих работ.

Для дальнейшей реализации проектов ТГБ-зондов необходимы заказчики и профессиональные разработчики новых технологий исследования ледниковых щитов Земли и других небесных тел. Получение уникальных знаний о пределах распространения жизни и эволюции планет Солнечной системы вполне заслуживают подобных усилий.

## Литература

1. Priscu J.C., Christner B.C. Earth's Icy Biosphere / Ed. A.T. Bull. // Microbial diversity and bioprospecting. Washington D.C.: ASM Press, 2004. P. 130–145.
2. Priscu J.C., Christner B.C., Foreman C.M., Royston-Bishop G. Biological material in ice cores // Encyclopedia of Quaternary Sciences. Elsevier, 2007. P. 1156–1167.
3. Boetius A., Anesio A.M., Deming J.W., Mikucki J.A., Rapp J.Z. Microbial ecology of the cryosphere: sea ice and glacial habitats // Nature Reviews Microbiology. AOP, published online 7 September 2015 / doi: 10.1038/nrmicro3522.
4. Зеленчук А.В., Крыленков В.А. Криобот для исследования ледяных щитов планет // Природа. 2018. № 3. С. 12–23.
5. Evans S.E., Wallenstein M.D. Climate change alters ecological strategies of soil bacteria // Ecology Letters. 2014. V. 17. № 2. P. 155–164.
6. Nikrad M.P., Kerkhof L.J., Häggblom M.M. The subzero microbiome: microbial activity in frozen and thawing soils // FEMS Microbiology Ecology. 2016. 92. fiw081 DOI: 2016.
7. Gilichinsky D.A. Permafrost model of extraterrestrial habitat // Astrobiology. Berlin, Heidelberg: Springer, 2002. P. 125–142.
8. Mitrofanov I., Anfimov D., Kozyrev A., Litvak M., Sanin A., Tret'yakov V., Krylov A., Shvetsov V., Boynton W., Shinohara C., Hamara D., Saunders R.S. Maps of subsurface hydrogen from the high energy neutron detector Mars Odyssey // Science. 2002. T. 297. № 5578. С. 78–81.
9. Feldman W.C., Prettyman T.H., Maurice S., Plaut J.J., Bish D.L., Vaniman D.T., Mellon M.T., Metzger A.E., Squyres S.W., Karunatillake S., Boynton W.V., Elphic R.C., Funsten H.O., Lawrence D.J., Tokar R.L. Global distribution of near surface hydrogen on Mars // Journ. of Geophys. Research: Planets. 2004. T. 109. № E9.
10. Dobiński W. The cryosphere and glacial permafrost as its integral component // Central European Journ. of Geosciences. 2012. V. 4. № 4. P. 623–640.

## References

1. Priscu J.C., Christner B.C. Earth's Icy Biosphere. Ed. A.T. Bull. Microbial Diversity and Bioprospecting. Washington D.C. ASM Press., 2004: 130–145.
2. Priscu J.C. Christner B.C., Foreman C.M., Royston-Bishop G. Biological material in ice cores. Encyclopedia of Quaternary Sciences. Elsevier, 2007: 1156–1167.
3. Boetius A., Anesio A.M., Deming J.W., Mikucki J.A., Rapp J.Z. Microbial ecology of the cryosphere: sea ice and glacial habitats. Nature Reviews Microbiology. 2015. AOP, published online 7 September. doi: 10.1038/nrmicro3522.
4. Zelenchuk A.V., Krylenkov V.A. Cryobot for the study of ice shields of planets. *Priroda*. Nature. 2018, 3: 12–23. [In Russian].
5. Evans S.E., Wallenstein M.D. Climate change alters ecological strategies of soil bacteria. *Ecology Letters*. 2014, 17 (2): 155–164.
6. Nikrad M.P., Kerkhof L.J., Häggblom M.M. The subzero microbiome: microbial activity in frozen and thawing soils. *FEMS Microbiology Ecology*. 2016. 92. fiw081 DOI: 2016.
7. Gilichinsky D.A. Permafrost model of extraterrestrial habitat. *Astrobiology*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2002: 125–142.
8. Mitrofanov I., Anfimov D., Kozyrev A., Litvak M., Sanin A., Tret'yakov V., Krylov A., Shvetsov V., Boynton W., Shinohara C., Hamara D., Saunders R.S. Maps of subsurface hydrogen from the high energy neutron detector Mars Odyssey. *Science*. 2002, 297 (5578): 78–81.
9. Feldman W.C., Prettyman T.H., Maurice S., Plaut J.J., Bish D.L., Vaniman D.T., Mellon M.T., Metzger A.E., Squyres S.W., Karunatillake S., Boynton W.V., Elphic R.C., Funsten H.O., Lawrence D.J., Tokar R.L. Global distribution of near-surface hydrogen on Mars. *Journ. of Geophys. Research: Planets*. 2004, 109 (E9).
10. Dobiński W. The cryosphere and glacial permafrost as its integral component. *Central European Journ. of Geosciences*. 2012, 4 (4): 623–640.
11. Doran P.T., Fritsen C.H., Murray A.E., Kenig F., McKay C.P., Kyne J.D. Entry approach into pristine

11. *Doran P.T., Fritsen C.H., Murray A.E., Kenig F., McKay C.P., Kyne J.D.* Entry approach into pristine ice-sealed lakes – Lake Vida, East Antarctica, a model ecosystem // *Limnology and Oceanography: Methods*. 2008. V. 6. № 10. P. 542–547.
12. *Priscu J.C., Achberger A.M., Cahoon J.E., Christner B.C., Edwards R.L., Jones W.L., Michaud A.B., Siegfried M., Skidmore M.L., Spigel R.H., Switzer G.W., Tulaczyk S., Vick-Majors T.J.* A microbiologically clean strategy for access to the Whillans Ice Stream subglacial environment // *Antarctic Science*. 2013. V. 25. № 5. P. 637–647.
13. *Dachwald B., Mikucki J., Tulaczyk S., Digel I., Espe C., Feldmann M., Francke G., Kowalski J., Xu C.* IceMole: a maneuverable probe for clean in situ analysis and sampling of subsurface ice and subglacial aquatic ecosystems // *Annals of Glaciology*. 2014. T. 55. № 65. C. 14–22.
14. *Doran P.T., Vincent W.F.* Environmental protection and stewardship of subglacial aquatic environments // *Antarctic subglacial aquatic environments*, 2011. P. 149–157.
15. *Siegert M.J., Priscu J.C., Alekhina I.A., Wadham J.L., Lyons W.B.* Antarctic subglacial lake exploration: first results and future plans // *Philosophical Transactions of the Royal Society. Ser. A*. 2016. V. 374. № 2059. P. 20140466.
16. *Rack F.R.* Enabling clean access into Subglacial Lake Whillans: development and use of the WISSARD hot water drill system // *Philosophical Transactions of the Royal Society. Ser. A*. 2016. V. 374. № 2059. P. 20140305.
17. *Talalay P.G., Zagorodnov V.S., Markov A.N., Sysoev M.A., Hong J.* Recoverable autonomous sonde (RECAS) for environmental exploration of Antarctic subglacial lakes: general concept // *Annals of Glaciology*. 2014. № 55 (65). P. 23–30.
18. *Stone W.C., Hogan B., Siegel V., Lelievre S., Flesher C.* Progress towards an optically powered cryobot // *Annals of Glaciology*. 2014. № 55 (65). P. 1–13.
19. Электронный ресурс: [http://zoom.cnews.ru/rnd/article/item/lazernyj\\_robot\\_gotovitsya\\_burit\\_ldy\\_drukih\\_planet](http://zoom.cnews.ru/rnd/article/item/lazernyj_robot_gotovitsya_burit_ldy_drukih_planet).
20. *Bank M., Haridim M., Tsingouz V., Ibragimov Z.* Highly effective handset antenna // *Intern. Journ. of Communications*. 2012. V. 6. № 2. P. 80–87.
21. *Стребков Д.С., Некрасов А.И.* Резонансные методы передачи и применения электрической энергии. М.: изд. Всерос. науч.-исслед. ин-та электрификации сельского хозяйства Россельхозакадемии (ВИЭСХ), 2013. 582 с.
22. *Strebkov D.S.* Prospectives of using technologies of Nicola Tesla in up-to-date power engineering // *Light & Engineering*. 2014. V. 22. № 2.
23. *Зеленчук А.В., Зеленчук В.А., Крыленков В.А.* Термогидробур для изучения льдов, ледников и подледниковых озер // *Сб. трудов II Междунар. науч.-практич. конф. «Природная среда Антарктики: современное состояние изученности»*. Беларусь, Нарочь, 2016. С. 137–142.
- ice-sealed lakes – Lake Vida, East Antarctica, a model ecosystem. *Limnology and Oceanography: Methods*. 2008, 6 (10): 542–547.
22. *Priscu J.C., Achberger A.M., Cahoon J.E., Christner B.C., Edwards R.L., Jones W.L., Michaud A.B., Siegfried M., Skidmore M.L., Spigel R.H., Switzer G.W., Tulaczyk S., Vick-Majors T.J.* A microbiologically clean strategy for access to the Whillans Ice Stream subglacial environment. *Antarctic Science*. 2013, 25 (5): 637–647.
23. *Dachwald B., Mikucki J., Tulaczyk S., Digel I., Espe C., Feldmann M., Francke G., Kowalski J., Xu C.* IceMole: a maneuverable probe for clean in situ analysis and sampling of subsurface ice and subglacial aquatic ecosystems. *Annals of Glaciology*. 2014, 55 (65): 14–22.
24. *Doran P.T., Vincent W.F.* Environmental protection and stewardship of subglacial aquatic environments. *Antarctic subglacial aquatic environments*. 2011: 149–157.
25. *Siegert M.J., Priscu J.C., Alekhina I.A., Wadham J.L., Lyons W.B.* Antarctic subglacial lake exploration: first results and future plans. *Philosophical Transactions of the Royal Society. Ser. A*. 2016, 374 (2059). 20140466.
26. *Rack F.R.* Enabling clean access into Subglacial Lake Whillans: development and use of the WISSARD hot water drill system. *Philosophical Transactions of the Royal Society. Ser. A*. 2016, 374 (2059): 20140305.
27. *Talalay P.G., Zagorodnov V.S., Markov A.N., Sysoev M.A., Hong J.* Recoverable autonomous sonde (RECAS) for environmental exploration of Antarctic subglacial lakes: general concept. *Annals of Glaciology*. 2014, 55 (65): 23–30.
28. *Stone W.C., Hogan B., Siegel V., Lelievre S., Flesher C.* Progress towards an optically powered cryobot. *Annals of Glaciology*. 2014. 55 (65): 1–13.
29. [http://zoom.cnews.ru/rnd/article/item/lazernyj\\_robot\\_gotovitsya\\_burit\\_ldy\\_drukih\\_planet](http://zoom.cnews.ru/rnd/article/item/lazernyj_robot_gotovitsya_burit_ldy_drukih_planet).
30. *Bank M., Haridim M., Tsingouz V., Ibragimov Z.* Highly effective handset antenna. *Intern. Journ. of Communications*. 2012, 6 (2): 80–87.
31. *Strebkov D.S., Nekrasov A.I.* *Rezonansnye metody peredachi i primeneniya elektricheskoy energii*. Resonance transmission technique and application of electrical energy. Moscow: GNU VIESKH, 2013: 582 p. [In Russian].
32. *Strebkov D.S.* Prospectives of using technologies of Nicola Tesla in up-to-date power engineering. *Light and Engineering*. 2014, 22 (2).
33. *Zelenchuk A.V., Zelenchuk V.A., Krylenkov V.A.* Thermal hydraulic boring drill for studying ice, glaciers and subglacial lakes. *Sbornik trudov. II Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konf. «Prirodnaya sreda Antarktiki: sovremennoye sostoyanie izuchennosti»*. Collection of research papers of the II Intern. Scientific and Practical Conf. «The Natural Environment of the Antarctic: The Present State of Exploration». Belarus, Naroch, 2016: 137–142. [In Russian].