

ЗОНДЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛЕДЯНЫХ ЩИТОВ И ПОДЛЕДНИКОВЫХ СРЕД ПЛАНЕТ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ



А.В. Зеленчук¹, В.А. Крыленков¹

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



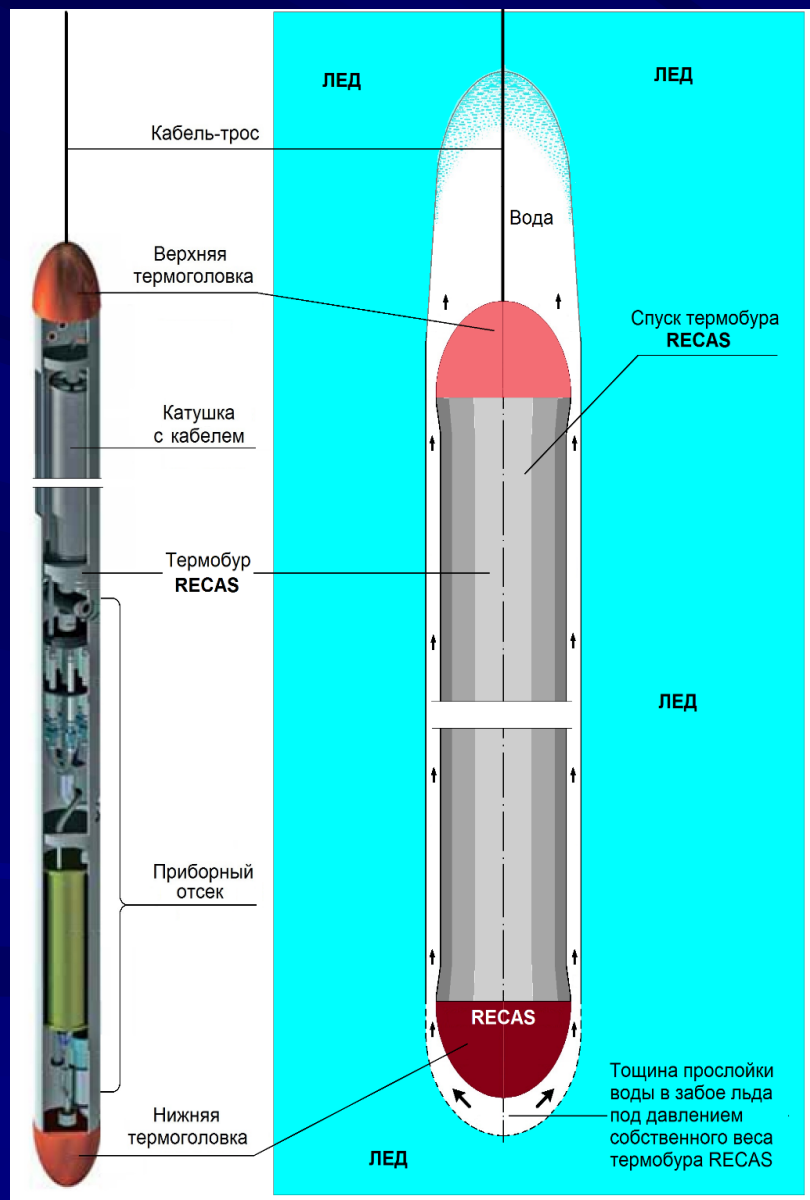
Изучение ледяных щитов и подледниковых водных сред Арктики и Антарктики, жизнедеятельности микроорганизмов в криогенных средах дает уникальную информацию об эволюции Земли и жизни на ней. Такие исследования необходимы для прогнозирования климата и негативных последствий изменения природной среды нашего обитания на Земле.



Для этого необходимы зонды для герметичного проникновения сквозь льды в подледниковые среды, разработки которых сопряжены с рядом принципиальных инженерно-технических проблем, решение которых ускорит создание современных автономных зондов для изучения криогенных сред на Земле и других небесных телах.

Перед отправкой таких зондов, как планирует NASA, на спутник Юпитера Европу, где толщина льда до 30 км, глубина подледного океана – до 100 км, их имеет смысл апробировать в условиях Антарктиды – при исследовании, например, уникального озера Восток, покрытого льдом толщиной до 4 км и изолированного от окружающей среды в течение 15 миллионов лет.

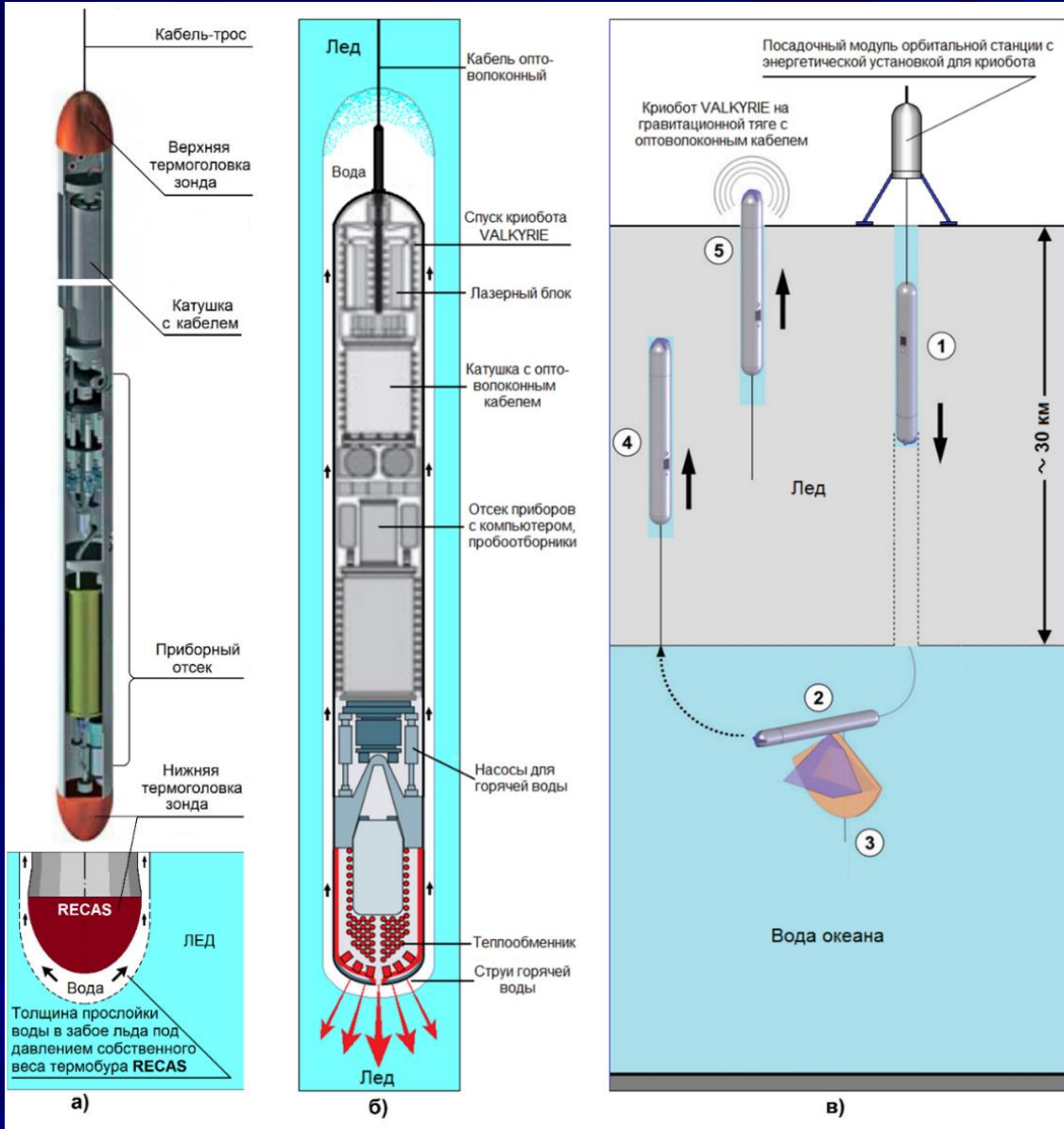
Известной командой Талалая (2014 г.) был предложен извлекаемый автономный зонд-термобур RECAS для герметичного проникновения через массивные льды в подледниковые озера на Земле, проплавляющий лед термоголовками на торцах его корпуса, внутри которого размещены приборный отсек и катушка с несущим кабелем, соединённым с пультом управления и электрогенератором на ледяной поверхности [2].



Когда нижняя термоголовка плавит лед, RECAS движется вниз под действием собственной силы тяжести, а несущий кабель разматывается с катушки, размещенной внутри корпуса зонда, и выходит через небольшое центральное отверстие в верхней термоголовке. Талая вода в скважине выше зонда быстро замерзает, охватывая неподвижный относительно массива льда кабель, обеспечивая тем самым ледяную изоляцию зонда и подледниковой среды от поверхности. Такой зонд движется сквозь лед внутри герметичного ледяного «кокона», заполненного талой водой.

Для подъема зонда на поверхность верхняя термоголовка плавит лед, а кабель с усилием, создаваемым электромеханическим приводом, наматывают на катушку внутри зонда и, таким образом, сила давления зонда в верхний ледяной забой при подъеме определяется силой натяжения кабеля, а талая вода в скважине ниже зонда быстро замерзает, обеспечивая целостность естественной ледяной изоляции подледниковой среды.

По оценкам команды Талалая зонд RECAS весом 5000 Н, с диаметром 150 мм и длиной 4 м, оснащенный электрогенератором мощностью 9–10 кВт, способен развить скорость во льду до 1,7 м/ч, что обеспечит цикл исследований в массиве льда на глубинах до 5 км длительностью 8–9 месяцев при штате обслуживающего персонала (4–5 чел.). Это в 10–20 раз дешевле, чем применение электромеханического бурения или бурения горячей водой. Однако, сроки миссии RECAS значительно превышают допустимое время сезонных работ в Арктике и Антарктике (2–3 месяца), а большая механическая нагрузка на несущий кабель может привести к его обрыву.



Примерно такой же принцип конструирования зонда был предложен командой Стоуна из США при проектировании крибота VALKYRIE для исследований толстого (до 30 км) ледяного покрова и подледного океана Европы, спутника Юпитера [3].

В этом криботе термоголовка оснащена соплами, выпускающими в ледяной забой струи горячей воды, то есть будет применена комбинация проплавления льда и гидродинамического бурения горячей водой.

Предполагается также, что крибот, будет потреблять энергию через лазер мощностью 250 кВт от источника с ядерным топливом, расположенным на ледяной поверхности Европы. Для подвода энергии лазера к криботу специалисты из США намерены использовать оптическое волокно толщиной в несколько микрон. Причем, такой энергоинформационный кабель будет намотан на катушку внутри корпуса крибота, и будет разматываться по мере спуска крибота.

Как и RECAS крибот VALKYRIE будет двигаться сквозь лед под действием собственной силы тяжести внутри герметичного ледяного «кокона», заполненного талой водой.

Проекты зондов RECAS (а) и VALKYRIE (б) для изучения ледяных щитов и подледниковых сред на Земле и других планетах: (в) Этапы миссии крибота VALKYRIE на Европе - спутнике Юпитера:

1– спуск через лед; 2– поворот в воде и перемещение в радиусе 1 км подо льдом; 3 – съемки рельефа дна боковым эхолотом; 4 – поворот в воде и подъем сквозь лед; 5 – выход на ледяную поверхность Европы.

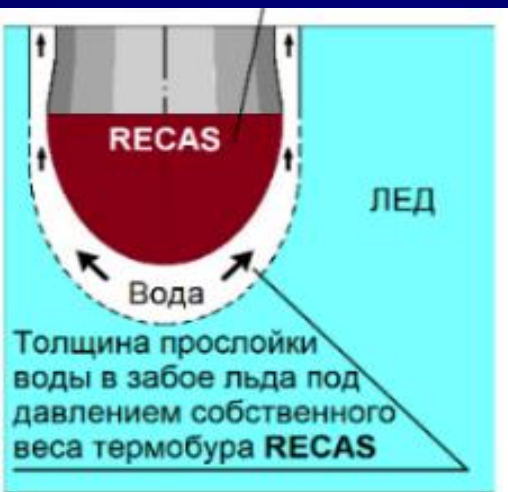
Достигнув подледного океана Европы, криобот VALKYRIE должен изменить свое положение и плавучесть (как подводная лодка), и упираясь термоголовкой в лед подъемной силой Архимеда, протаивать его для подъема на поверхность льда спутника, что резко усложняет конструкцию и не снимает зависимость от гравитации планеты.

При испытаниях на Аляске в 2015 году макет такого криобота (длиной 1,6 м, диаметром 0,45 м и мощностью 5 кВт) пробурил лед на глубину в 30 м при скорости проходки примерно в 1 м/ч.

Проплавление льда на Европе, где гравитация и собственный вес VALKYRIE в 10 раз меньше, чем на Земле, может обернуться падением скорости бурения и большими потерями тепла, причем для проходки льда толщиной в 30 км и обратно, может потребоваться более 8-ми лет.



Билл Стоун - от идеи криобота Valkyrie, макетных и полевых испытаний на Земле...до...исследований в космосе?!

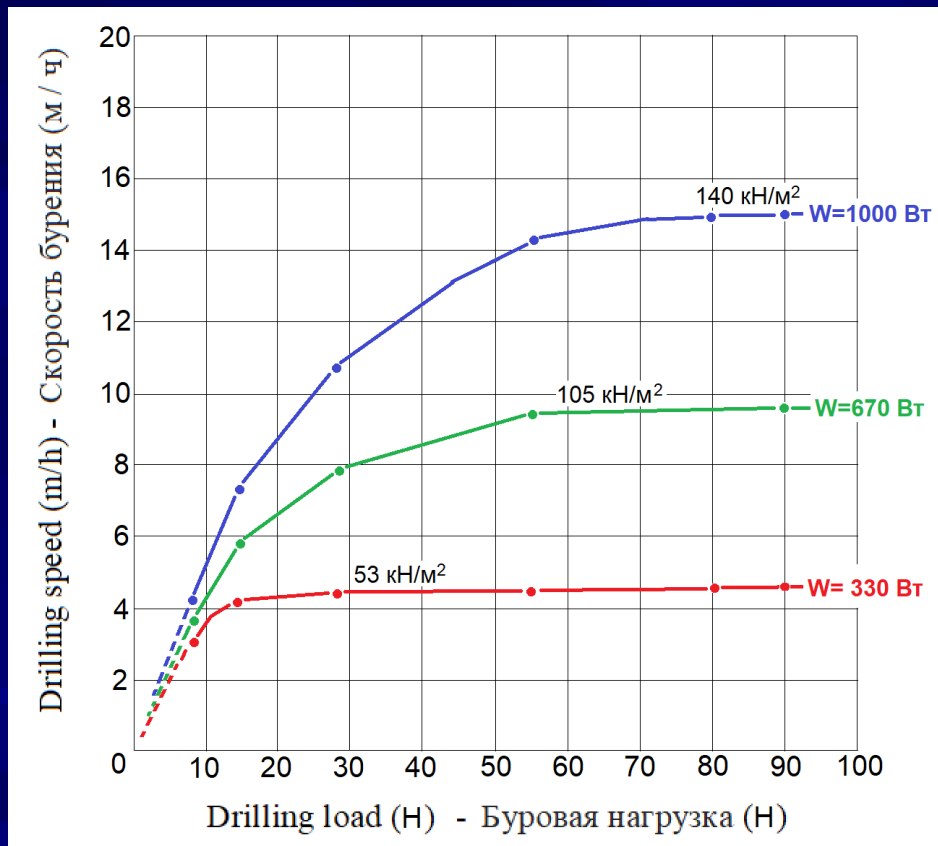


Главным недостатком термобуров типа RECAS и криобота VALKYRIE, проплавающих толщ льда под давлением собственного веса (иными словами, под воздействием гравитационной тяги) является малая скорость бурения вследствие большого термического сопротивления водяной прослойки в забое между льдом и термоголовкой, пропорционального толщине этой прослойки.

Простое повышение мощности термоголовки с целью увеличения скорости бурения льда может привести к парообразованию и увеличению прослойки воды. Это снизит теплоотдачу в ледяной забой, а термоголовка может перегореть.

В целях безопасного увеличения мощности термоголовки, и скорости бурения, необходимо увеличить теплоотдачу термоголовки в лед через прослойку талой воды, например, уменьшив ее толщину путем воздействия дополнительной силой на зонд в направлении его движения.

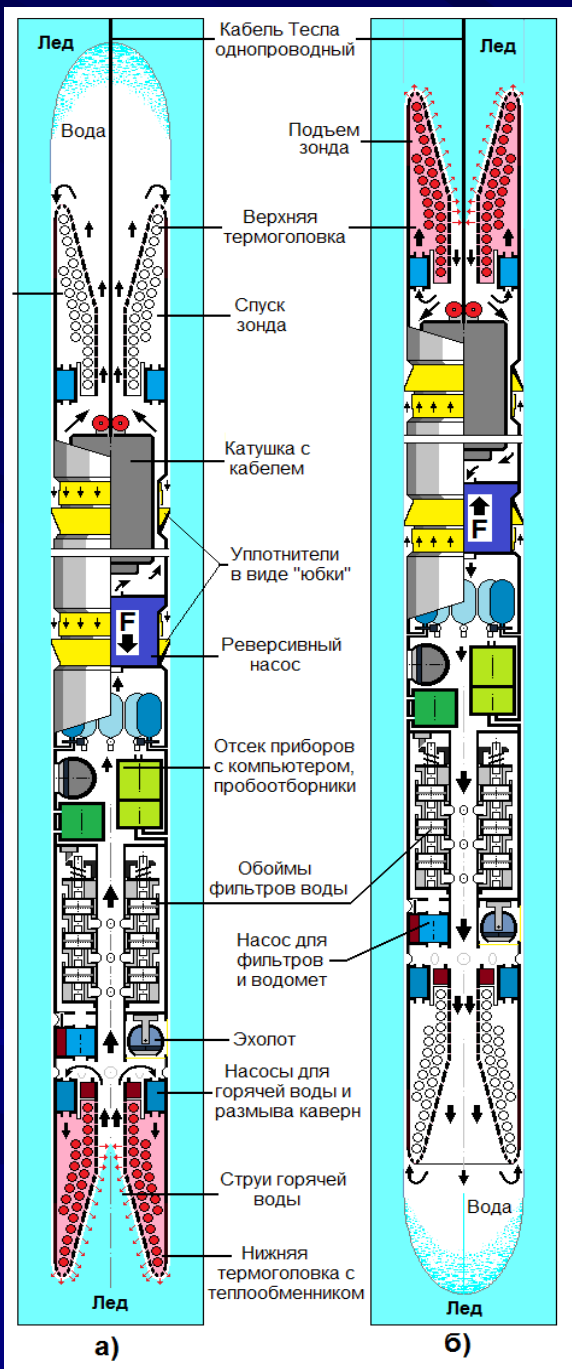
Авторы предлагают создать более легкие чем RECAS (вес 5000 Н) и VALKYRIE зонды, но, которые способны (в этом принципиальное отличие) самостоятельно генерировать некую силу по направлению движения зонда, обеспечивая необходимые удельные нагрузки на забой льда на больших глубинах, вне зависимости от гравитации небесных тел.



На рисунке показана зависимость скорости бурения от мощности термоголовки и осевой нагрузки макета зонда при температуре льда - 12 °С. При малом весе зонда (вес - 8 Н) для достижения максимальной скорости бурения (достижения «плато») необходимо (как видно из рис.) увеличить мощность термоголовки и давление зонда на дно скважины от 5 до 13 раз.

По нашим оценкам, уровни удельной нагрузки и «плато самой высокой скорости бурения» будут пропорциональны мощности тепловой головки зонда. Теоретически это позволит легкому 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.

Зависимость скорости бурения-проплавления льда от мощности и осевой нагрузки зонда-макета при температуре льда -12 °С (параметры макета: диаметр – 27 мм, длина – 350 мм, мощность – до 1 кВт, вес – 8 Н, вес в воде – 5,6 Н).



Мы предлагаем воздействовать на зонд гидравлической силой, создаваемой самим термобуром за счет перепада давления воды на торцах цилиндрического корпуса зонда [1]. Термический гидравлический буровой зонд (ТГБ-зонд) для исследования льдов и подледниковых водных сред представлен на рис. 4а и 4б.

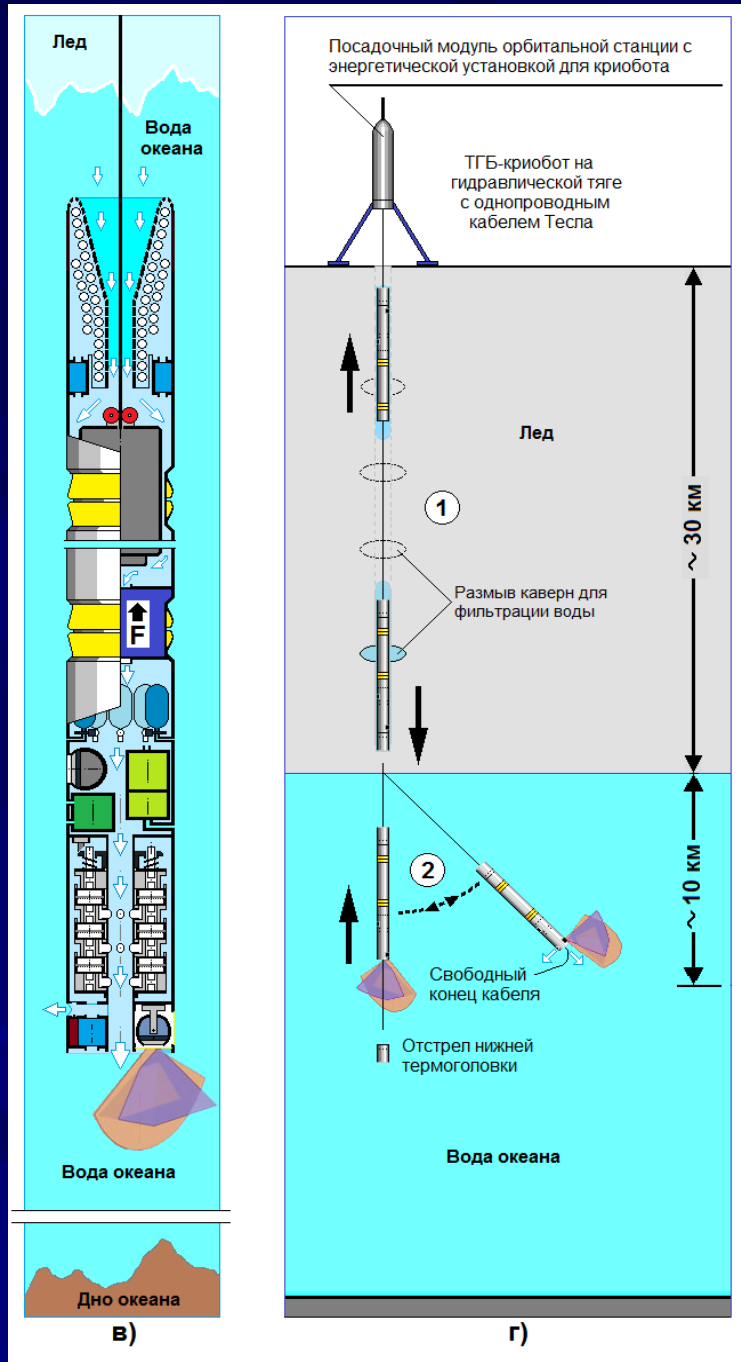
На верхнем и нижнем торцах трубчатого корпуса ТГБ-зонда установлены термоголовки в виде воронок с каналами, предназначенными для перекачки талой воды сквозь зонд. Внутри корпуса установлены реверсивный гидронасос, привод катушки с намотанным на нее несущим кабелем, который, разматываясь, выходит через отверстие в верхней термоголовке за пределы зонда.

Над нижней термоголовкой размещен приборный отсек зонда с приводами для взятия проб воды и донного грунта. В углублениях по периметру внешнего корпуса ТГБ-зонда установлены пары разнонаправленных уплотнителей в виде «юбок».

Когда ТГБ-зонд движется вниз, включен нагрев нижней термоголовки, а из ледяного забоя талая вода откачивается насосом сквозь зонд – в верхнюю часть скважины. В зоне ледяного забоя создается разрежение, под действием которого возникает обратный ток воды через зазор между стенкой скважины и внешним корпусом зонда. Под действием тока воды раскрывается «юбка» уплотнителя, края которой плотно прижимаются к скважине и перекрывают обратный ток воды. В результате возникает перепад давления ΔP в сечении S зонда и сила F , которая давит на зонд, уменьшая прослойку воды в забое, что, в свою очередь, увеличивает теплоотдачу термоголовки и, соответственно, скорость движения ТГБ-зонда.

Значение силы F можно вычислить в соответствии с законом Паскаля, умножив перепад 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 8000 Н и 16000 Н, соответственно, превысив собственный вес зонда в десятки 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 ΔP , создаваемый гидронасосом.

Применение гидравлической силы (тяги) – это принципиально новое качество конструкции ТГБ-зонда (криобота), отличающее его от зондов типа RECAS и VALKYRIE, которое позволит зонду двигаться в глубине льда в любых направлениях с максимальной скоростью на небесных телах с разной гравитацией.



Именно гидравлическая сила (тяга), позволяющая зонду самостоятельно подниматься на поверхность льда, снижает прочностные требования к несущему кабелю и делает возможным применение компактной однопроводной системы Тесла для безопасного питания и телеуправления ТГБ-зонда.

Планируемые параметры ТГБ-зонда для проникновения в лед до глубины 5 км: диаметр – до 10 см, длина до 4 м; вес до 300 Н без кабеля; средний диаметр троса - 1мм; общая мощность зонда – 10 кВт; средняя скорость движения – 10 м/ч при мощности термоголовки 5 кВт и температуре льда до -60°C ; время исследований – до 2-х месяцев.

При подъеме ТГБ-криобота на поверхность ледяного щита можно не наматывать кабель на катушку внутри зонда, а выводить его сквозь зонд, за пределы корпуса свободным концом вниз через специальный привод, как показано на рис. 4 г.

После извлечения ТГБ-криобота с пробами на поверхность льда на вмороженный кабель можно «нанизать» другой криобот для дальнейших детальных исследований льда и подледного океана, но уже без катушки с громоздким кабелем. Снимая энергию и информацию контактно или бесконтактно специальным роликовым блоком, можно такой «облегченный» зонд неоднократно перемещать по кабелю вниз и вверх, используя вмороженный кабель как направляющий монорельс, не нарушая при этом ледяной изоляции, что позволит снизить финансовые и временные затраты на проникновение в толщу льда, и увеличить объемы исследований.

Рис. 4 - Концептуальный проект ТГБ-зонда для исследования толстых ледяных и подледных сред планет без нарушения их ледяной изоляции: в) ТГБ-криобот в воде подледного океана спутника Юпитера Европы; г) предполагаемая схема движения ТГБ-криобота и отбора проб при его движении через лед и в водной среде океана Европы.

Однопроводная система Tesla позволяет уменьшить потери энергии, вес и габариты катушки с кабелем в несколько раз и не допускает короткого замыкания при перекручивании кабеля. Например, однопроводный стальной кабель-трос диаметром 1 мм и длиной 5 км, поместится на катушке длиной 100 см при ее диаметре 8 см, и будет весить 250 Н, имея грузоподъемность 1000 Н, что достаточно при малых нагрузках. Для передаваемой мощности 20 кВт, эффективная плотность тока такой линии доходит до 600 А/мм², а удельная электрическая мощность до 4 МВт/мм², что более чем достаточно. Снимать энергию и информацию можно контактно или бесконтактно специальным роликовым блоком внутри зонда. Компьютер позволит автоматически поддерживать режим резонанса напряжений однопроводного кабеля, то есть настраивать собственную частоту резонанса линии при изменении длины кабеля-троса, температуры окружающей среды и других факторов, обеспечивая минимальные потери энергии [4].

Примеры реализации однопроводной энергосберегающей системы Tesla Всероссийский институт электрификации сельского хозяйства (ГНУ ВИЭСХ)



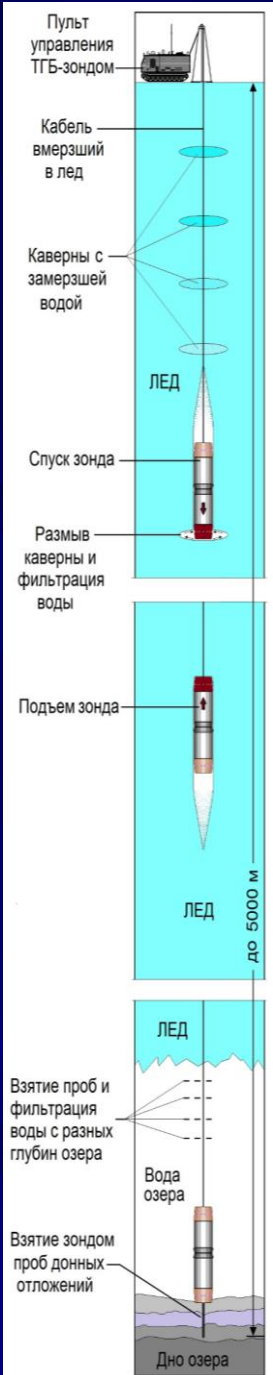
Система питания беспилотных летательных аппаратов (2013 год)



Принципиально ТГБ-криобот может передвигаться как во льду, так и в воде (посредством водометных струй), т.е. одновременно быть криогидроботом, что позволяет одинаково успешно исследовать как льды, так и подледниковые среды (озеро Восток в Антарктиде, или океан на спутнике Юпитера). Криобот же VALKYRIE американцы планируют использовать в основном в массиве льда, а в подледниковую среду выпускать специальный гидробот, что, по нашему мнению, усложнит и удорожит проект.

По сравнению с проектируемым «Stone Aerospace» и финансируемым NASA криботом VALKYRIE предлагаемый нами ТГБ-крибот позволит:

- снизить примерно в 10 раз мощность источника питания, который необходимо доставить на ледяную поверхность Европы;
- увеличить на порядок скорость (до 50 м/ч) и уменьшить диаметр зонда;
- уменьшить диаметр катушки с кабелем, применив однопроводную систему Тесла, поскольку в ней минимальны ограничения по радиусу изгиба кабеля и пределу передаваемой мощности, исключены короткие замыкания, а потери энергии в режиме резонанса напряжений малы;
- значительно ускорить возврат крибота с пробами на ледяную поверхность, используя гидравлическую силу подъема, которая может на два порядка (до 100 раз) превысить подъемную силу Архимеда;
- сократить цикл (спуск + подъем) исследований ледяного щита и подледниковой среды на Земле до 1-2х месяцев при средней скорости движения крибота 10 м/ч и общей мощности 10 кВт;
- сократить цикл (спуск + подъем) исследований ледяного покрова и подледного океана Европы с 8 лет до 4-х месяцев при средней скорости движения крибота 30 м/ч;
- уменьшить в несколько раз объем и массу крибота, затраты на его доставку к спутнику Юпитера при многократном снижении рисков исследовательской миссии и стоимости всех сопутствующих работ.



Для дальнейшей реализации проектов ТГБ-зондов нужны заказчики и профессиональные разработчики автономных зондов для герметичного проникновения в подледниковые среды на Земле. Использование ТГБ-зондов в Антарктике и Арктике позволит астробиологам уже на Земле многое узнать о потенциальных возможностях существования жизни в холодных мирах Солнечной системы и, соответственно, подготовиться к исследовательским миссиям на других планетах.

Литература

1. Зеленчук А.В., Крыленков В.А. Криобот для исследования ледяных щитов планет. // Природа. (2018). № 3. С. 12-23.
2. Talalay PG, Zagorodnov VS, Markov AN, Sysoev MA, & Hong J. Recoverable autonomous sonde (RECAS) for environmental exploration of Antarctic subglacial lakes: general concept. Annals of Glaciology. 2014. 55 (65). P. 23-30.
3. 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.
4. Стребков Д.С., Некрасов А.И. Резонансные методы передачи и применения электрической энергии. // М. ВИЭСХ, 4-е издание, 2013. 582 с.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ

