

АСТРОБИОЛОГИЧЕСКИЙ АСПЕКТ РОССИЙСКИХ МЕРЗЛОТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В АРКТИКЕ, АНТАРКТИКЕ И В ПОЛЯРНЫХ РАЙОНАХ ЛУНЫ И МАРСА

Введение

Феномен земной полярной криосферы — явление в Солнечной системе не уникальное. Наличие и распределение мерзлоты на планетах контролируется главным образом расстоянием от Солнца, характером атмосферы, наклоном оси вращения к плоскости эклиптики и эндогенной активностью недр. Из школьного курса астрономии и географии мы знаем, что понижение температуры на полюсах Земли связано с уменьшением здесь угла падения солнечных лучей. А сменой времен года мы обязаны углу наклона оси вращения Земли к эклиптике $23,4^\circ$, благодаря которому во время годового цикла вращения Земля «подставляет» Солн-



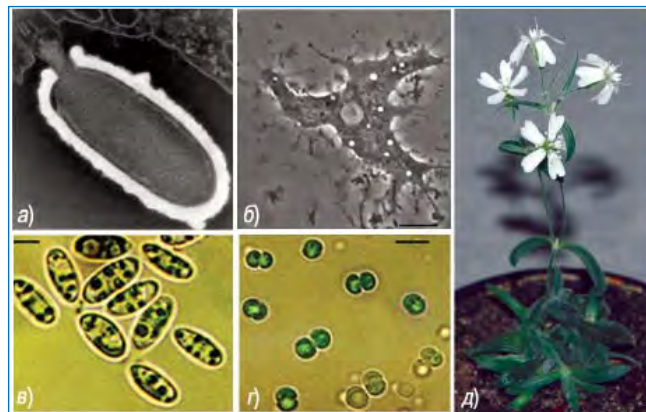
Различия в углах наклона оси вращения к плоскости эклиптики у Земли, Луны и Марса.

цу то Северное, то Южное полушарие. По сравнению с Землей, Марс удален примерно на 50 % дальше от Солнца, имеет неплотную атмосферу и слабую геологическую активность, из-за этого среднегодовая температура на его экваторе составляет около -55°C (что в точности соответствует среднегодовой температуре в самом холодном месте на Земле — на российской антарктической станции Восток), а на полюсах -125°C . При этом Марс обладает углом наклона оси вращения $25,2^\circ$, который определяет наличие смены времен года. Луна по своему астрономическому положению могла бы характеризоваться сходными с Землей температурными условиями, но в связи с отсутствием атмосферы и большей продолжительностью суток средние температуры здесь значительно ниже -69°C на экваторе и -178°C на полюсах, а амплитуды колебаний значительно выше (на экваторе от $+117^\circ\text{C}$ днем до -180°C ночью). В связи с вертикальностью оси вращения Луны к эклиптике на нашем спутнике нет смены времен года, но есть интересный феномен полярных вечно затененных кратеров. В этой статье рассказывается о поисках жизни в криолитосфере Марса и поисках льдосодержащего реголита (реголит — лунный грунт) в полярных кратерах на Луне и о том, как эти исследования пересекаются с изучением мерзлоты в Арктике и Антарктике на Земле.

Арктика

Мерзлота занимает порядка 20 % суши Земли, арктический шельф также частично слагается мерзлыми породами. В России более 60 % площади входит в зону вечной мерзлоты, которая предопределяет специфику и сложность хозяйственного освоения территорий, необходимость применения здесь неординарных науч-

ных и инженерных решений. Являясь наиболее динамичной частью литосферы, мерзлота быстро реагирует на климатические изменения (температура мерзлоты в Российской Арктике за последние 30 лет повысилась на $0,5\text{--}2^\circ\text{C}$), а изменения мерзлоты, в свою очередь, оказывают ощутимое влияние на наземные экосистемы. С позиций фундаментальной науки важнейшей стороной мерзлотоведения в последнюю четверть века стало изучение криобиосферы. Ученым из подмосковного наукограда Пушкино под руководством Да-



Жизнеспособные организмы, выделенные из мерзлоты:

а — гигантский вирус *Pithovirus*, инфицирующий амеб; б — голая амеба рода *Acanthamoeba*; в — зеленая водоросль рода *Scotiellopsis*; г — цианобактерия рода *Gleocapsae*; д — растение *Silene stenophylla*.

вида Гиличинского в ходе многолетних исследований удалось доказать, что мерзлые породы содержат жизнеспособные микроорганизмы, возраст которых исчисляется моментом замерзания осадка. Был организован ряд экспедиций на Индигиро-Колымскую низменность, где распространены одни из самых мощных, низкотемпературных и древних мерзлых пород Северного полушария. В полевых условиях проводилось бурение скважин и отбор кернов для последующих датировок и микробиологических анализов. В стерильных лабораторных условиях из центра кернов брались незагрязненные образцы и помещались на питательные среды. В результате на чашках Петри обнаруживались различные вирусы, археи, водоросли, амебы и т.д. А в 2012 г. пушкинскими учеными была опубликована облетевшая мир статья, в которой сообщалось о регенерации семечка растения *Silene stenophylla*, выделенного из мерзлой породы с низовий Колымы возрастом около 30 тыс. лет.

Марс

Обнаружение жизнеспособных микроорганизмов в земной мерзлоте совпало с обнаружением замерзшей воды на Марсе и тем самым подогрело споры о возможности поисков жизни на нашем соседе в Солнечной системе. Расшифровка геологической истории Марса показала, что на ранних стадиях эта планета развивалась по сходному с Землей сценарию — в северном полушарии Марса существовал океан, имелась плотная атмосфера, выпадали атмосферные осадки и текли реки, а значит, нет причин исключать возможность зарождения примитивной жизни. Затем, примерно 4 млрд лет назад,

возможно вследствие соударения с гигантским астероидом, происходит глобальная климатическая перестройка и Марс навсегда теряет океан и плотную атмосферу. Несмотря на обнаружение многочисленных свидетельств существования в прошлом гидросферы (береговая линия океана, сухие русла рек, слоистые морские отложения), до начала 2000-х гг. оставалось загадкой, сумел ли Марс в своих недрах сохранить часть водных запасов? Или холодная и сухая пустыня — именно такой увидели красную планету первые американские спускаемые посадочные аппараты и марсоходы — исчерпывающая характеристика современного состояния Марса?

В 2001 г. на орбиту Марса выходит орбитальный аппарат NASA Mars Odyssey. В состав научной нагрузки спутника входил российский детектор нейтронов высоких энергий HEND (созданный в Институте космических исследований РАН под руководством Игоря Митрофанова) — прибор, который в комплексе с американским гамма-спектрометром GRS был призван произвести картирование распределения воды в приповерхностном слое реголита мощностью 1,5 м. В результате было сделано открытие северного и южного мерзлотных районов Марса. Под сухим слоем реголита здесь скрывался мерзлый реголит, содержащий 40–60 % воды по массе.

В 2012 г. в журнале «Криосфера Земли» нами была опубликована статья, где обосновывался выбор мест посадки российских космических аппаратов, целью которых был бы поиск жизнеспособных микроорганизмов на Марсе. Похожие на Антарктиду гигантские ледники северной и южной полярных шапок Марса не могут служить такой целью, так как их возраст, судя по статистике кратеров на поверхности, составляет менее 15 млн лет, т.е. эти ледники сформированы в эпоху отсутствия жизни на поверхности Марса. Жизнь на примитивном уровне могла сохраняться всю историю Марса в подмерзлотных водоносных горизонтах, но расчеты, основанные на измеренных температурах поверхности Марса и оценках геотермического потока из недр, показывают, что водоносные горизонты, вероятно, находятся на глубине более 1,5 км, а значит — недоступны для исследований на современном уровне технических возможностей.

Казалось бы, как и для случая поиска жизни в подледном океане спутника Юпитера Европы, скрытом 10–30 км толщей льда, вопрос о поиске жизни на Марсе откладывается. Однако, согласно нашей гипотезе, положительный ответ на вопрос о наличии жизни на красной планете можно постараться найти уже сейчас, исследовав мерзлые отложения в окрестностях марсианских вулканов. Известно, что последние извержения вулканов Марса согласно статистике кратеров на лавовых потоках имели место всего несколько миллионов лет назад, а значит, вулканы могли быть теми проводниками, которые подняли микроорганизмы из подмерзлотных водоносных горизонтов и доставили их на поверхность, где они оказались законсервированными в вечной мерзлоте. В ближайших планах национальных космических агентств NASA, EASA и Роскосмоса до 2020 г. запуски аппаратов с целью биологических экспериментов в полярные области Марса не значатся. Однако, как показала успешная посадка и работа американского посадочного аппарата Phoenix, исследовавшего мерзлые породы в арктической зоне Марса на 68° с.ш., подобный проект вполне реализуем на современном уровне техники.

Антарктида

В любом случае астробиологам (так называют ученых, занимающихся изучением вопросов зарождения и распространения жизни во Вселенной) есть чем заняться в ближайшие годы до проведения биологических экспериментов на Марсе. С 2005 г. в составе Российской антарктической экспедиции работает отряд мерзлотоведения, занимающийся созданием сети скважин мониторинга температурного режима мерзлых пород Антарктиды, палеогеографическими реконструкциями и астробиологическими исследованиями. По ряду параметров антарктическая мерзлота оказывается ближе к марсианской, чем мерзлота Арктики. Во-первых, среднегодовая температура мерзлоты в ряде районов Антарктиды может достигать $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$, что значительно ниже температуры арктической мерзлоты. Во-вторых, самые древние мерзлые породы Арктики, из которых выделены жизнеспособные организмы, имеют возраст около 3 млн лет, тогда как континентальный дрейф предопределил появление Антарктиды и возможность наличия там мерзлых пород 35–40 млн лет назад. В-третьих, в отличие от арктических ландшафтов в Антарктиде практически нет высших растений и развитых почв.

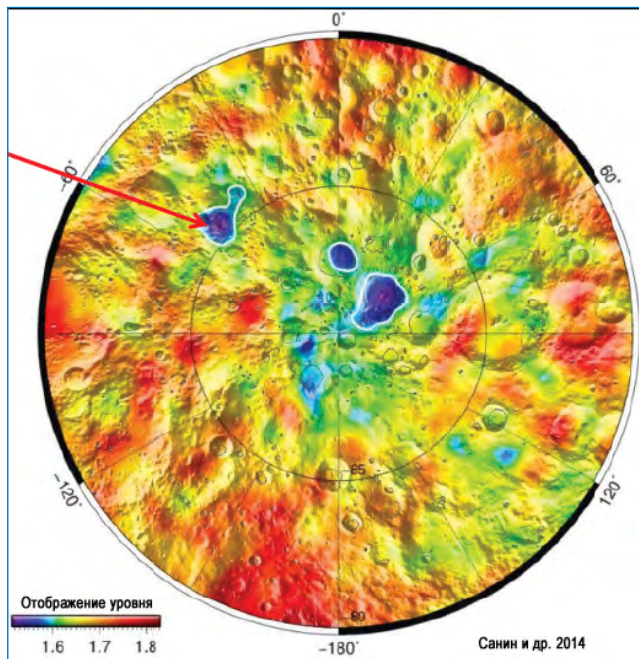
В рамках 60-й Российской антарктической экспедиции планируются совместные работы с национальной экспедицией Новой Зеландии в так называемых «Сухих долинах» Антарктиды. Уникальность этого самого крупного антарктического оазиса с астробиологических позиций вызвана наличием здесь самой холодной и древней мерзлоты на Земле. Фазовые переходы воды здесь, как и на Марсе, проходят в условиях отсутствия жидкой фазы, сходно и то, что льдосодержащая мерзлота перекрывается сверху слоем сухого грунта. С 70-х гг. XX века NASA проводит здесь испытания приборной нагрузки марсианских посадочных аппаратов. Целью наших полевых работ будет бурение в районе четырех полевых лагерей и отбор мерзлых кернов для дальнейших исследований по выделению жизнеспособных микроорганизмов и датировкам отложений. Из-за лимита на вес оборудования, транспортируемого зарубежными вертолетами, будет использована отечественная малогабаритная буровая установка УКБ 12/25, которая хорошо зарекомендовала себя в предшествующие антарктические экспедиции. В случае успешного проведения полевых работ последующие аналитические исследования могут позволить выделить самые древние жизнеспособные микроорганизмы на Земле, обнаружить самый древний лед (мерзлые породы Антарктиды на порядок древнее ледникового щита). Экстраполяция этих результатов на Марс позволит расширить районы возможного поиска жизни, так как вулканических образований возрастом менее 1 млн лет (таков максимальный возраст выделенных из арктической мерзлоты микроорганизмов) на Марсе всего несколько, а мерзлых вулканических образований возрастом более 30 млн лет здесь значительно больше.

Полюса Луны

В связи с вертикальностью оси вращения Луны к плоскости эклиптики солнечный свет никогда не попадает в кратеры, находящиеся вблизи ее полюсов. Температура вечно затененных кратерах ниже $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$, молекулы воды при таких температурах движутся очень медленно, поэтому эти кратеры служат своеобразными холодными ловушками для H_2O . Наличие ловушки само по себе еще не означает присутствия там залежи воды.

Доставленные на Землю в ходе программ Apollo и Луна образцы лунных пород показали, что в отличие от Марса на нашем спутнике никогда не было поверхностных водоемов. Однако два гипотетических источника воды для холодных ловушек все же есть. Первый источник — солнечный ветер, который являет собой поток испускаемой Солнцем плазмы, в том числе ядер водорода. Эти ядра водорода имплантируются в грунт, где, объединяясь с кислородом (основной породообразующий элемент на Земле и на Луне), образуют OH и H₂O. Вторым предполагаемым источником — кометы, которые за историю существования Луны многократно сталкивались с ее полюсами.

В 2009 г. NASA отправило к Луне орбитальный аппарат LRO, в состав научной нагрузки которого входил прибор LEND, созданный (как и его марсианский предшественник HEND) в Институте космических исследований РАН. В результате работы российского прибо-



Карта распределения воды в южном полярном районе Луны по данным российского прибора LEND. Красной стрелкой указан вечно затененный кратер Кабеус с максимальным обнаруженным количеством воды.

го. Биологический анализ образца лунной мерзлоты, с учетом вышеописанного феномена длительной криоконсервации микроорганизмов в земной мерзлоте, может во многом пролить свет на гипотезу панспермии, согласно которой жизнь на Земле была привнесена из космоса. В перспективе космические агентства NASA, ESA и Роскосмос обсуждают возможность сооружения в 2030-х гг. на южном полюсе Луны обитаемой полярной станции, которая будет функционировать на принципах международной кооперации по типу МКС.

Помимо Земли, Марса и Луны, о которых речь шла выше, вода в замерзшем состоянии есть на лу-

нах Урана и Нептуна, Плутона, кометах и, возможно, на полюсах Меркурия. Экстремально холодные (с нашей точки зрения) экосистемы совсем не обязательно являются таковыми для их обитателей. Феномен длительной криоконсервации живых существ в земной мерзлоте открывает широкие перспективы поисков жизни за преде-

Планируемые запуски к Луне в рамках российской программы исследования Луны*

Название пректа	Год	Задача
Луна – Глоб (орбитальный аппарат)	2017 г.	Отработка посадки в полярном районе
Луна – Глоб	2019 г.	Детальное картирование южного полярного района с целью выбора мест посадки для аппарата Луна-Ресурс
Луна – Ресурс	2020 г.	Криогенное бурение на глубину > 2 м в южном полярном районе
Луна-28	2021 г.	Доставка грунта с окрестностей южного полюса
Луна-29	2023 г.	Исследование южного полярного района с помощью лунохода
International Moon Station	После 2020 г.	Первая обитаемая лунная станция, сооружение астрофизической обсерватории, форпост для запусков аппаратов к Марсу

* – согласно докладом Marov M. Ya., Bazilevskiy A.T., Dolgoplov V.P., Head J.W. Selection and characterization of landing sites for the upcoming Russian robotic missions to the Moon. COSPAR 40th Scientific Assembly, August 5, 2014, Moscow, talk B0.1-0033-14. и Zelenyi L., Mitrofanov I., Petrukovich A., Khartov V., Martynov M., Doolgoplov V., Shevchenko V. Russian lunar space program. COSPAR 40th Scientific Assembly, August 3, 2014 Moscow, talk B0.1-0005-14. на научной ассамблее Международного комитета по исследованию космического пространства Cospar 2014.

ра в полярных областях Луны были обнаружены районы с повышенной концентрацией воды в реголите, причем положение некоторых из этих районов совпадает с вечно затененными кратерами. Это открытие стало прологом для реализуемой в настоящее время российской лунной исследовательской программы. Программа сконцентрирована на изучении южного полюса Луны и включает криогенное бурение на глубину более 2 м, исследования с помощью спутников, спускаемых аппаратов и лунохода, а также возвращение для исследований на Земле образца лунной мерзлоты (см. табл.). Разработкой космических аппаратов, выбором мест посадок и научной программой занимаются Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина, Институт космических исследований РАН и Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадско-

лами Земли. Не исключено, что жизнь при отрицательной температуре может оказаться характерной особенностью нашей Солнечной системы. А ближайших продвижений в решении одного из важнейших мировоззренческих вопросов современной науки — наличия жизни за пределами Земли — следует ждать от исследований Сухих долин Антарктиды, южного полюса Луны и мерзлотных районов Марса.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 14-05-00548-а.

*Н.Э. Демидов (ИФХиБПП РАН),
С.Р. Веркулич (АНИИ),
Е.М. Ривкина (ИФХиБПП РАН)*