

## ЗАГАДКА БУЛГУННЯХОВ ДОЛИНЫ ГРЁНДАЛЕН (ШПИЦБЕРГЕН)

Наблюдения за реакцией составляющих криосферы Земли (снежный и ледяной покров, ледники, мерзлота) на текущие изменения климата приобретают в последнее время все большее значение. Это подтверждается появлением под эгидой Всемирной метеорологической организации (ВМО) новых международных программ, сайтов и региональных центров для накопления информации по мониторингу криосферы, расширением сети мониторинга. Архипелаг Шпицберген является важным звеном этой сети на западной границе Евразийской Арктики: в последние десятилетия на большей части архипелага идет интенсивное сокращение оледенения. С 2001 года здесь, в районе п. Баренцбург, на базе Российского научного центра на архипелаге Шпицберген (РНЦШ) и Российской научной арктической экспедиции на архипелаге Шпицберген (РАЭ-Ш) проводятся работы специалистов ААНИИ, в результате которых был организован комплекс (полигон) наблюдений и исследований практически всех местных компонентов криосферы.

При создании наблюдательной сети криосферного полигона сотрудники ААНИИ не могли обойти вниманием загадочные бугры, которые располагаются в долине Грёндален, примерно в 12 км от Баренцбурга. Выделяясь своими размерами среди прочих мерзлотных форм рельефа, эти бугры вызывали большой исследовательский интерес еще и потому, что представляют собой одно из самых ярких и недостаточно изученных проявлений мерзлоты — образование и развитие булгунняхов (от якут. булгуннях — «холм», «вершина»). Булгунняхы — это конические поднятия с ледяным ядром. Шпицбергенские булгунняхы достигают высоты 42 м при диаметре в первые сотни метров. В англоязычной литературе при наименовании холмов с ледяным ядром используют термин “pingo”, позаимствованный у инуитов, коренных обитателей арктической зоны Северной Америки. У тюркоязычных народов Южной Сибири их называют «тебелер» (от тюрк. — «холм», «вершина»). Уже этот небольшой этимологический экскурс позволяет судить, как широко распространены эти формы рельефа на Земле, но всех их объединяет то, что располагаются они в зоне вечной

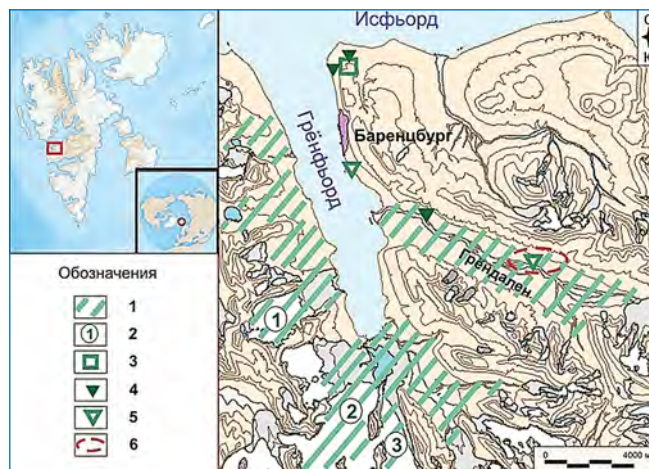


Схема наблюдательной сети криосферного полигона в районе п. Баренцбург: 1 – районы весенней снегомерной съемки; 2 – определение ежегодных масс-балансовых показателей ледников Альдегонда (1), Западный Грёндфьорд (2), Восточный Грёндфьорд (3); 3 – площадка наблюдений за динамикой сезонного слоя (CALM); 4 – скважины в мерзлоте, оборудованные термокосомами для непрерывных измерений; 5 – скважины для разовых измерений температуры вечной мерзлоты; 6 – район развития булгунняхов

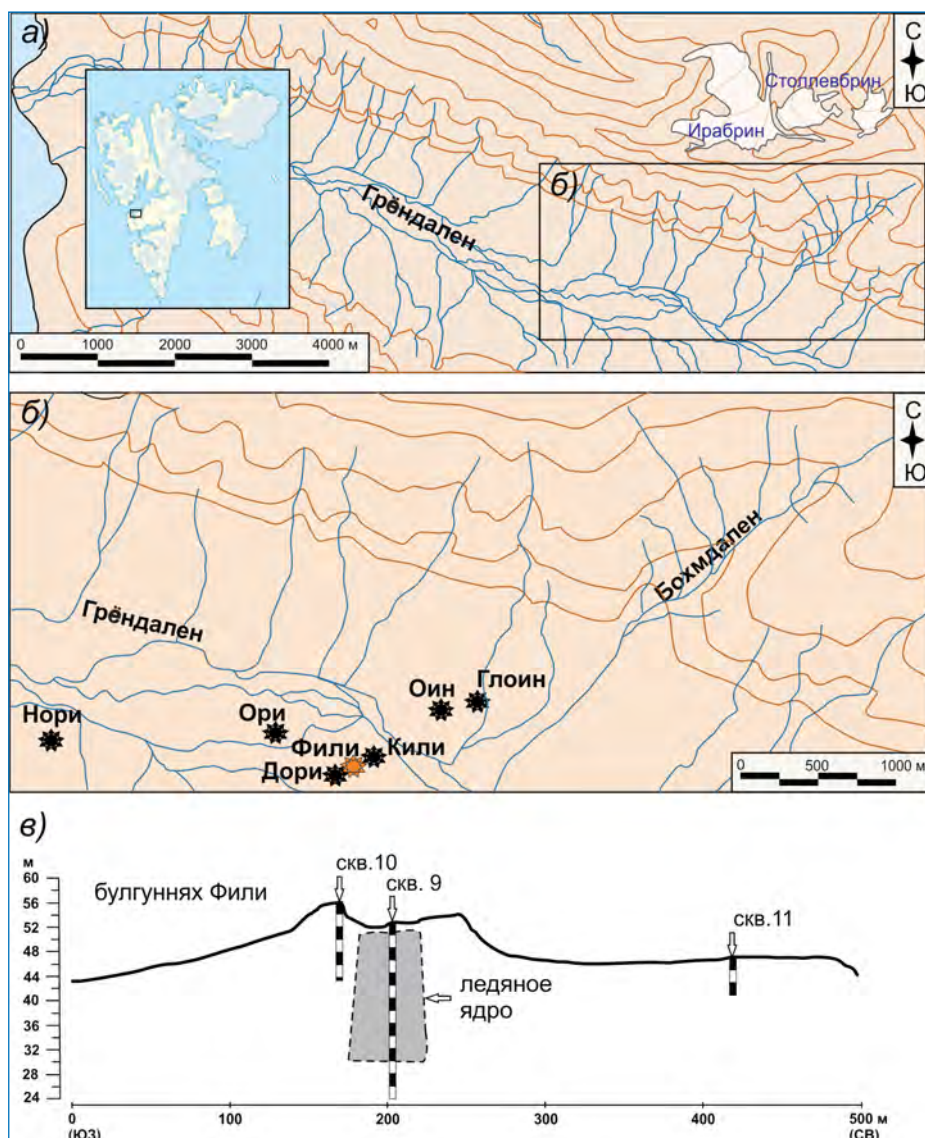
мерзлоты, с которой неразрывно связан их генезис. Всего на земном шаре насчитывается более 10 000 подобных бугров, порядка 80 из них обнаружены на Шпицбергене.

Изучение булгунняхов в долине Грёндален подразумевало поиск ответов на следующие вопросы: как и когда они появились (и почему именно в этой части долины), каково их внутреннее строение, что послужило источником воды для образования ледяного ядра? Способом получения необходимой информации стало бурение в 2017–2018 годах одного из булгунняхов с отбором кернов мерзлых грунтов и льда для последующих анализов, что на архипелаге делалось впервые.

Помимо выполнения полевых и аналитических работ, перед исследователями также встала задача выбора наименований булгунняхов в долине Грёндален,

Буровая площадка в кратере булгуньяха Фили





Район исследований на острове Западный Шпицберген: а – долина Грэндален, б – положение семи булгуньяхов в долине Грэндален, в – поперечный профиль булгуньяхы Фили

что является общепринятой практикой: в соседней долине Адвентдален, где располагается норвежский поселок Лонгйир, все подобные формы имеют имена. Коллективным решением команды сотрудников ААНИИ и РАЭ-Ш семи булгуньяхам в долине Грэндален присвоили имена гномов из романа Дж. Р. Р. Толкиена «Властелин колец», а именно: Нори, Ори, Дори, Фили, Кили, Оин и Глоин.

На выбор имен, помимо прочего, повлиял факт, что гномы, как и булгуньяхи, ассоциируются с подземным миром. Кроме того, булгуньяхи в долине Грэндален располагаются на одной из самых оживленных туристических снегоходных трасс Шпицбергена, и ассоциация с героями романа Толкиена должна вызвать познавательный интерес к мерзлотным буграм пучения у посетителей архипелага, многие из которых приезжают специально, чтобы узнать больше об арктической природе.

При бурении скважины на булгуньяхе Фили (скважина 9) под 1,5-метровыми мерзлыми отложениями было пройдено ледяное ядро мощностью 22 м, которое подстилалось мерзлыми засоленными глинами с крупными шлирами льда.

Лабораторные исследования отобранных кернов включали комплекс гидрохимических и изотопных ана-

лизис, причем гидрохимические анализы провели непосредственно в химико-аналитическом центре РАЭ-Ш в Баренцбурге, а изотопные выполнялись тоже силами ААНИИ, но уже в лаборатории ЛИКОС в Санкт-Петербурге. Основная цель аналитических исследований заключалась в определении источников воды, ответственных за образование ледяного ядра булгуньяха. Гидрокарбонатно-натриевый состав льда с минерализацией 0,03–0,43 г/л однозначно указывал, что ледяное тело образовалось за счет заморзания подземных вод; такие воды сейчас разгружаются на поверхность в виде родника у подножия булгуньяха Оин, имея гидрокарбонатно-натриевый состав и минерализацию 1,2 г/л. Лед булгуньяха сохранил первичное соотношение анионов и катионов, но имеет пониженную минерализацию по сравнению с исходной водой. Это объясняется тем, что только часть солей исходной воды могла включиться в лед, а остальная часть отжималась растущими кристаллами льда в нижележащие слои. Следствием этого процесса стала значительная соленость подстилающих ледяное ядро глин, что было подтверждено анализами водной вытяжки. Глины также имеют гидрокарбонатно-натриевый состав, а значит, их засоление не связано с морским влиянием и объясняется именно вышеописанным процессом криогенного концентрирования солей под нижней границей растущего ледяного тела.

Итак, во-первых, удалось доказать, что ледяное ядро образовано подземными водами, и исключить версии о том, что источником влаги для булгуньяха явилась морская или, например, речная вода. Важную информацию дали анализы изотопов  $\delta D$  и  $\delta^{18}O$ ; их результаты показали, что историю развития ледяного тела булгуньяха можно

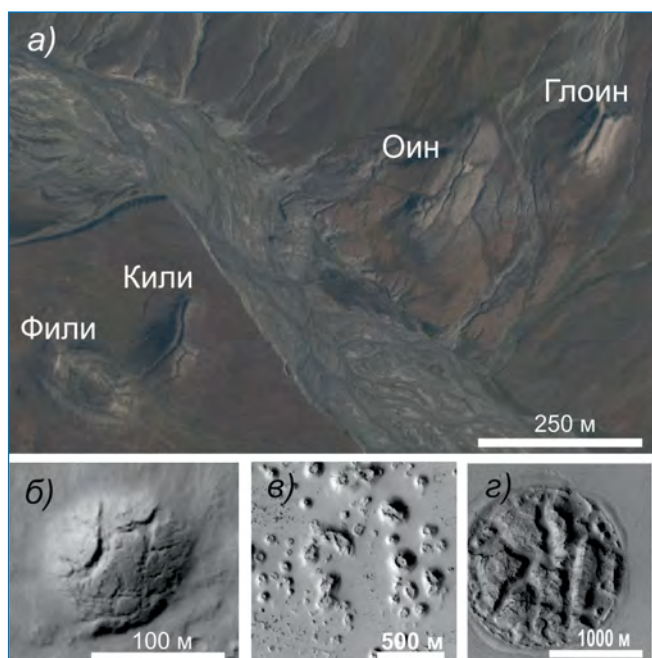
Керны из ледяного тела булгуньяха в поперечном сечении. Видны единичные вкрапления темного глинистого материала



разбить на четыре стадии, две из которых происходили в так называемой полузакрытой системе и две в закрытой системе. Закрытые системы характеризуются распределением изотопов, похожим на модель изотопного фракционирования при замерзании замкнутого объема воды. Вероятно, различие этапов льдообразования связано с изменением напора подмерзлотных вод в период роста ледяного тела. В свою очередь напор подмерзлотных вод и скорость водообмена под растущим ледяным телом будут зависеть от интенсивности питания подмерзлотных вод. Интересно, что практически единственным источником питания подземных вод на Шпицбергене в условиях вечной мерзлоты являются «теплые» ледники, у которых температура донных слоев льда 0 °С. Питание подземных вод под «теплыми» ледниками происходит за счет талых вод, возникающих при донном таянии ледника или поступающих вниз по трещинам и промоинам в летнее время. Парадоксально, но потепление климата приводит к уменьшению мощности и площади ледниковых покровов, а значит, и к промерзанию гляциальных таликов, питающих подземные воды, что сказывается на исчезновении родников на Шпицбергене.

Наличие булгунняхов на данном участке долины Грёндален свидетельствует о том, что именно здесь по велению природы совпали два фактора: быстрое (в геологическом смысле этого слова) промерзание отложений и наличие притока воды к фронту промерзания. Первый фактор был обусловлен осушкой в голоцене фьорда, ранее занимавшего долину до современных высотных отметок 50 м над уровнем моря; эта осушка инициировала быстрое промерзание сверху изначально талых отложений. Второй фактор связан с наличием тектонического разлома, на котором «сидят» булгунняхы. Он концентрировал разгрузку подземных вод, питавшихся «теплыми» ледниками на бортах долины. Вода подтягивалась к фронту промерзания, происходило образование льда, новые прослои льда приподнимали более ранние. В результате происходило пучение поверхности с образованием холма, а в разрезе ледяного тела наблюдается обратная стра-

Космоснимки булгунняхов в Грёндален и булгунняхоподобных конусов на Марсе:  
 а – космоснимок булгунняхов в Грёндален, б – булгунняхоподобное тело с трещинами в южном полушарии Марса (снимок камеры HiRISE), в – группа булгунняхоподобных холмов на поднятии Эллизиум (снимок камеры MOC), г – булгунняхоподобное тело в долине Атабаска (снимок камеры HiRISE)



тификация, когда наиболее молодые прослои находятся в глубине, а древние ближе к поверхности.

Интересные результаты дал мониторинг температуры булгунняхы, организованный с помощью термокосы, оставленной в скважине после бурения. Как отмечалось, под ледяным ядром были обнаружены мерзлые, а не талые породы, что является свидетельством окончания стадии роста бугра. В сентябре нулевая изотерма опускается на глубину 1,5 м, достигая поверхности ледяного ядра. Значит, происходит таяние льда с необратимым проседанием поверхности бугра по сценарию термокарста. Это служит объяснением наличия кратера с озером на вершине булгунняхы Фили. Несмотря на то, что мерзлота — самая инерционная составляющая криосферы, очевидно, что булгунняхы являются наиболее подверженными деградации мерзлотными формами на Шпицбергене, многие из них могут исчезнуть уже в ближайшие десятилетия.

Изучение механизмов развития мерзлотных бугров пучения имеет большой потенциал для применения в других областях науки, даже в планетарном аспекте. Условия образования булгунняхов на Шпицбергене возникают при осушке ранее занятых морем фьордов либо при отступании «теплых» ледников, поэтому реконструкция эволюции этих форм напрямую связана с фундаментальными для палеогеографии вопросами изменения уровня моря и климата, хода дегляциации. В планетарном аспекте изучение булгунняхов неожиданно обнаруживает точки соприкосновения с темой поиска воды и жизни на Марсе. Земные модели показывают, что даже в условиях земной криолитосферы, которая не столь сурова в температурном отношении, как марсианская, подземные воды зачастую не могут найти выхода на поверхность и образуют бугры пучения. Так, может быть, стоит детально исследовать марсианские формы рельефа, которые напоминают земные булгунняхы и распространены на «красной планете» достаточно широко?

Более того, если исследования на Земле покажут, что микроорганизмы, обитающие в подземных водах, способны сохраняться после попадания в ледяное тело булгунняхов, то мы получим отличную земную модель, которая способна стать прототипом для разработки проекта поиска жизни на Марсе. Неглубокое бурение марсианского булгунняхы с целью попытки выделения микроорганизмов из его ледяного ядра позволит протестировать гипотезу наличия биосферы в глубоких недрах Марса без глубокого бурения. Марсианские булгунняхы могут иметь и сугубо практическое применение. Российскими и американскими гамма- и нейтронными спектрометрами обнаружены мерзлые породы на высоких широтах Марса. Планируется, что ресурсом воды для жизнеобеспечения марсианских поселений будет льдонасыщенный реголит. Но если расположить базу в окрестностях марсианского булгунняхы, воду можно будет добывать непосредственно из ледяного тела, что значительно проще, чем выделять ее из льда порового пространства реголита.

Пока свои тайны открыл только булгуннях Фили. В планах работ ААНИИ и РАЭ-Ш стоит продолжение исследований булгунняхов Шпицбергена. Уже в сезон 2019 года предстоит разбурить ряд мерзлотных бугров и дополнить исследования проведением комплекса геофизических работ для построения трехмерных моделей ледяных тел, а также провести биогеохимические анализы подземных вод, мерзлоты и ледяных ядер. Посмотрим, будут ли и остальные гномы Толкиена столь же благосклонны к нашим попыткам разгадать тайны Шпицбергена.

*Н.Э. Демидов, С.Р. Веркулич (ААНИИ).  
 Фото авторов*