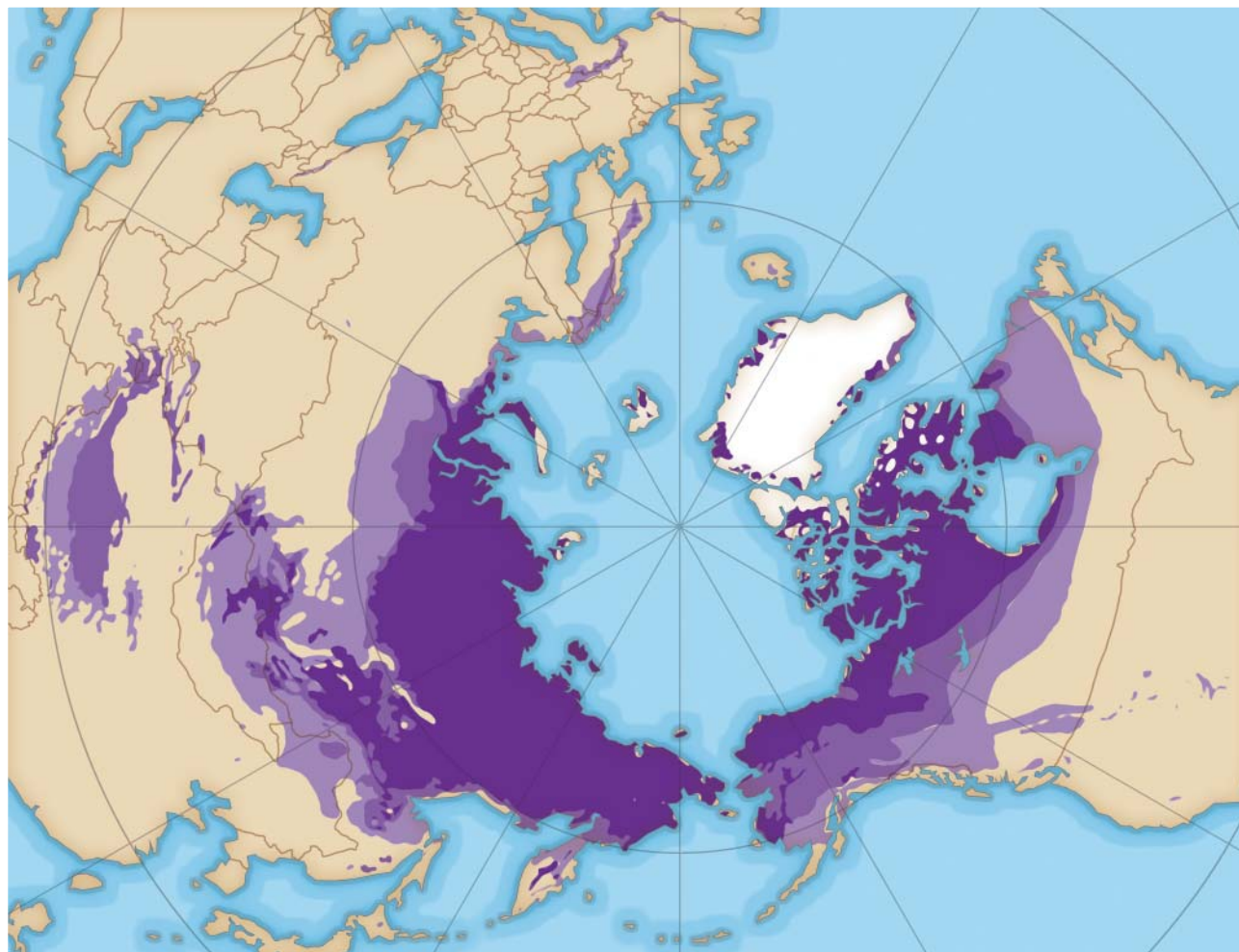


МЫ ЖИВЕМ НА ХОЛОДНОЙ ПЛАНЕТЕ

А. В. БРУШКОВ
М. ФУКУДА



Распространение многолетнемерзлых пород по северному полушарию Земли.
Схема разработана Международной ассоциацией исследователей по вечной мерзлоте (IPA)

В публикации использованы фотографии А. Брушкова

Закаляйся,
если хочешь быть здоров!
Постарайся
позабывать про докторов.
Водой холодной обтирайся,
если хочешь быть здоров!

В. И. Лебедев-Кумач

Вряд ли можно найти такой природный фактор, который оказывал бы столь драматическое влияние на растительный и животный мир Земли, как низкие температуры. Лишь тропическая область нашей планеты, за исключением ее высокогорных районов, не испытывает на себе воздействия холода.

Периоды глобального похолодания в истории Земли, связанные с развитием ледникового покрова и сужением климатических поясов, характеризовались изменением территорий распространения и вымиранием растений и животных в огромных масштабах. В результате в так называемых *криогенных* ландшафтах сформировались системы разного уровня, основанные на циклическом (зима—лето, ледниковая эпоха—межледниковье) круговороте биологического вещества и энергии.

Негативное действие отрицательных температур на живые организмы проявляется в ослаблении их жизнедеятельности, прекращении обмена веществ и появлении повреждений, вызванных образованием кристалликов льда в их клетках и тканях. Можно выделить три температурных диапазона существования устойчивых криосистем, каждый из которых характеризуется определенными особенностями в жизнедеятельности организмов:

- от 0 до -20°C — живые клетки могут быть активны;
- от -20 до -80°C — организмы находятся в анабиотическом состоянии;
- ниже -80°C (такая температура в естественных условиях на Земле не наблюдается) — происходит полная консервация биологических объектов (Лозина-Лозинский, 1972).

«Минус», совместимый с жизнью

Научные основы криобиологии были заложены еще в конце XIX в. русским ученым П. И. Бахметьевым, который изучал явление переохлаждения у насекомых и *анабиоз* (феномен временного прекращения жизнедеятельности) у летучих мышей.

За последние сто лет накопился большой фактический материал, касающийся устойчивости высших организмов к холоду. Так, выяснилось, что некоторые растения и животные выживают даже тогда, когда вода в их теле превращается в кристаллический лед.



ФУКУДА Масами — профессор Института низких температур Университета Хоккайдо (Саппоро, Япония). Специалист в области мерзлотоведения и экологии Севера. Автор более 200 статей, руководитель многих совместных российско-японских научных проектов в Сибири

БРУШКОВ Анатолий Викторович — доктор геолого-минералогических наук, профессор Тюменского нефтегазового университета, главный научный сотрудник Тюменского научного центра СО РАН. Научные интересы — физика и химия мерзлых пород, криолитозона как область жизнеобитания микроорганизмов. Автор и соавтор 4-х монографий и более 100 статей

Например, гусеницы некоторых бабочек, предварительно «закаленные», оживали после длительного замораживания при температуре от -78 до -269°C . После замораживания остаются жизнеспособными и многие черви, в том числе гельминты. Вернулся к жизни и замороженный ветвистоусый рачок *Chydorus sphaericus*, представитель зоопланктона, найденный на глубине 3,5 м в мерзлоте, возраст которой несколько тысяч лет (Каптерев, 1936).

Крупная древесная лягушка *Rana sylvatica*, живущая на Аляске, обладает способностью впадать в глубокую зимнюю спячку, во время которой температура ее тела опускается до -6°C без ущерба для «здоровья» (Storey, Kenneth, 1990). Возможно, эта лягушка — самый близкий человеку живой организм, способный пережить настоящее замораживание.

Длительное замораживание выдерживают и растения, принимающие для этого «специальные меры». Нужно сказать, что устойчивость многих наземных организмов к температурам ниже 0°C на протяжении всего жизнен-



Байджерахи — так по-якутски называются бугры округлой формы, останцы вечной мерзлоты, возникающие вследствие вытаявания из ископаемого льда глинистого материала

В мерзлых отложениях, которые находятся в Якутии и других северных регионах, содержится большое количество метана. Возможно, этот метан — результат действия метаногенов, принадлежащих к древней группе археобактерий

ного цикла зависит от сезона года. Например, так называемое «закаливание» растений, т.е. появление у них устойчивости к морозу, происходит только осенью, когда рост растений прекращается. Деревья, выдерживающие зимой морозы до -60°C (лиственница, ель, сосна), летом погибают при температуре $-7-8^{\circ}\text{C}$. По-видимому, впервые закаливание на практике применил русский огородник Е. А. Грачев в конце XIX в. Выдерживая семена кукурузы в течение двух недель перед посевом на снегу, он получал зрелые початки кукурузы в климатических условиях Петербурга.

И конечно, низкие и даже сверхнизкие температуры хорошо переносятся многими микроорганизмами (бактериями, дрожжами). На этой способности, по существу, основаны методы их длительного хранения. Устойчивость к холоду обычно обеспечивается обезвоживанием, повышением вязкости цитоплазмы, а также наличием оболочки, препятствующей проникновению кристаллов льда в клетку.

Точка замораживания воды, содержащей различные ионы, нахо-

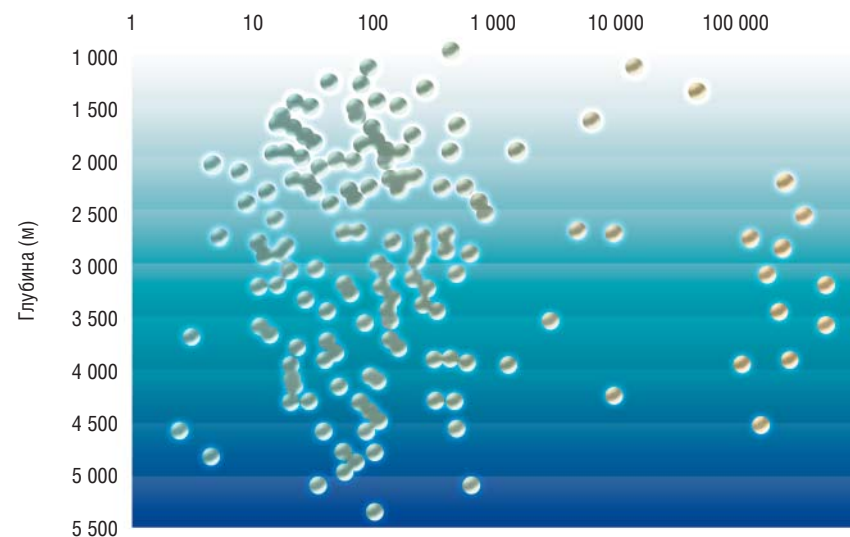
дится ниже 0°C и зависит от концентрации растворенных в ней веществ. В случае медленного замораживания клеток их содержимое может сохраниться в жидком состоянии при температуре значительно более низкой, чем точка заморзания соответствующего раствора. Это явление известно как *переохлаждение*. Вода, которая находится внутри клеток, в некоторых случаях не замерзает даже при температуре -20°C . Это явление было продемонстрировано на примере двустворчатых и брюхоногих моллюсков *Mytilus edulis* и *Littorina rudis* (Kanwisher, 1955).

Чтобы сохранить живые системы в условиях низких температур, применяют так называемые *криопротекторы*. Они ослабляют эффект кристаллизации, изменяя ее характер, препятствуют слипанию и денатурации макромолекул, способствуют сохранению целостности мембран клеток. Например, при замораживании спермы с целью предохранения сперматозоидов от холодовых повреждений рекомендуется добавлять к ней глицерин, яичный желток или диметилсульфоксид.

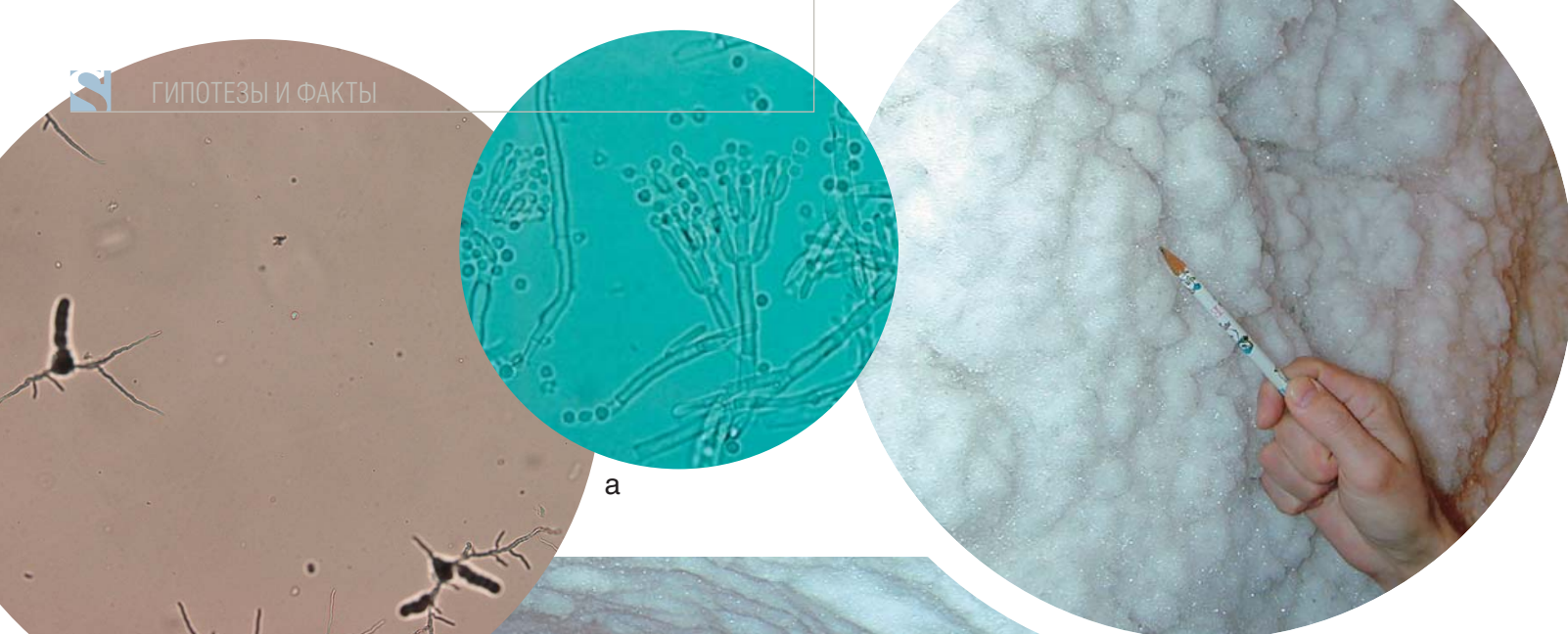
Древние экстремалы

В последние годы появилось много исследований, посвященных способности микроорганизмов длительное время существовать в экстремальных условиях среды. Биологи Университета штата Пенсильвания (США) обнаружили живые бактерии в кристаллах соли, возраст которых 250 млн лет (Vreeland et al., 2000). А поскольку целенаправленные работы по поиску живых микроорганизмов в древних породах не проводятся, то возраст наиболее древних живых организмов на Земле может оказаться еще более впечатляющим.

Концентрация метана в мерзлых отложениях Якутии (ppm)



Обнажение вечной мерзлоты на Мамонтовой горе (левый берег р. Алдан, Якутия) (б) разрушается рекой со скоростью до 1 м в год. Образцы для микробиологических исследований были отобраны из мерзлых отложений и ледяных жил (а), которые находились на глубине 0,9—1 м ниже слоя сезонного оттаивания, т.е. в условиях вечной мерзлоты



а



б

На стенах подземелья Института мерзлотоведения им. П. А. Мельникова СО РАН (Тюмень) (б) на глубине около 7 м был найден белый грибной мицелий (а). Изучив морфологические характеристики гриба и проведя анализ последовательности нуклеотидов его рибосомной РНК, ученые установили, что он близок к плесневому грибку *Penicillium echinulatum* и, возможно, представляет собой новый вид

У бактерий есть удивительная способность — образовывать споры при возникновении неблагоприятных условий, превращаясь в покрытые жестким панцирем «образования» с замедленным (или остановленным) метаболизмом. Находясь в таком состоянии длительное время и подвергаясь жесточайшим воздействиям внешней среды, они способны вернуться к своей обычной жизнедеятельности при возникновении благоприятных условий. Изучение древних микроорганизмов является одним из важных направлений современной науки,

причем наибольших успехов в этой области, по-видимому, можно достичь при исследовании мерзлых пород: недаром температура большей части земной поверхности ниже +5°C.

Первая информация о жизнеспособности микроорганизмов, обнаруженных в мерзлоте, была получена в XIX в. Большинство подобных исследований проводилось на арктических и антарктических мерзлых породах, которые находились в замороженном состоянии в течение нескольких миллионов лет. Оказалось, что некоторые бактерии, которые удалось выделить из таких пород, при повышении температур до положительных значений были способны к росту (Gilichinsky, Wagener, 1995).

Во льдах в районе антарктической станции «Восток» были обнаружены бактерии, грибы, диатомеи и другие микроорганизмы. В антарктическом ледяном щите на глубине 3,6 тыс. м были найдены цианобактерии (сине-зеленые водоросли); их возраст соответствовал возрасту льда на этой глубине (около 500 тыс. лет). В лабораторных условиях выделенные изо льда штаммы микроорганизмов росли в широком диапазоне температур: от 4 до 50°C выше нуля (Абызов и др., 1979).

И все же: откуда в мерзлых породах появляются живые микроорганизмы? Способны ли они «жить», а не просто «существовать» при отрицательных температурах?

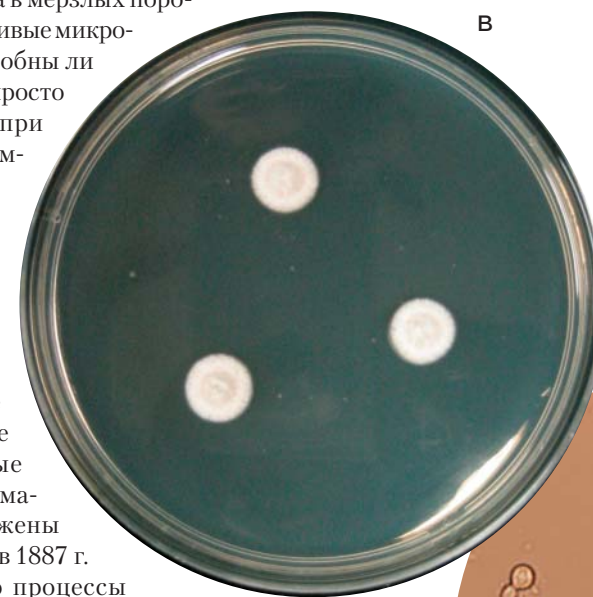
Ученые установили, что большинство микроорганизмов не могут размножаться при температурах ниже 0°C, однако это не аксиома: впервые подобные экстремалы были обнаружены Д. Фостером еще в 1887 г. Выяснилось, что процессы метаболизма у бактерий могут идти при температурах около -20°C (Friedmann, 1994), и таких фактов обнаружено немало. При температурах ниже 0°C способны расти также эукариотические микроорганизмы: некоторые дрожжи, а также грибы (Kataayama и др., 2007).

Тем не менее, следует признать, что вероятность роста и деления микроорганизмов, которые находятся в многолетнемерзлых породах, не слишком велика по причине промерзания почвы и кристаллизации в ней воды. Поры замерзающей породы насыщаются льдом на

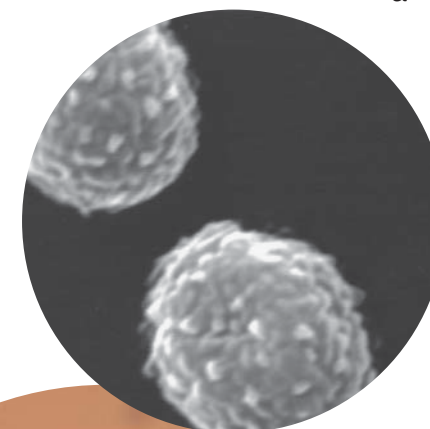
85—90% и более. Заключенные в них микроорганизмы занимают пространство, размеры которого лишь немногим превышают их собственные; поэтому они лишены способности к движению. Следовательно, условия для их роста и размножения в вечной мерзлоте или являются неблагоприятными, или полностью отсутствуют.

Образцы грибного мицелия, найденного в подземелье Института мерзлотоведения, вместе с образцами штаммов *P. echinulatum* из банка культур были инкубированы при разных температурах. Выделенный из мерзлоты новый штамм, в отличие от ранее известных, сравнительно быстро рос при температуре -5°C. Однако, несмотря на такую устойчивость к холоду, новый штамм вполне может быть современным, занесенным с поверхности

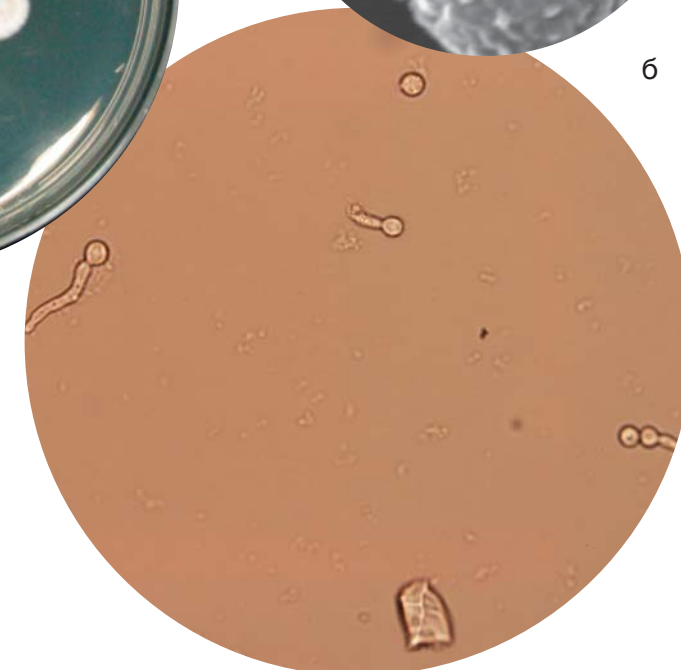
а — споры гриба (под электронным микроскопом);
б — прорастающие споры;
в — рост гриба при температуре -5°C



в



а



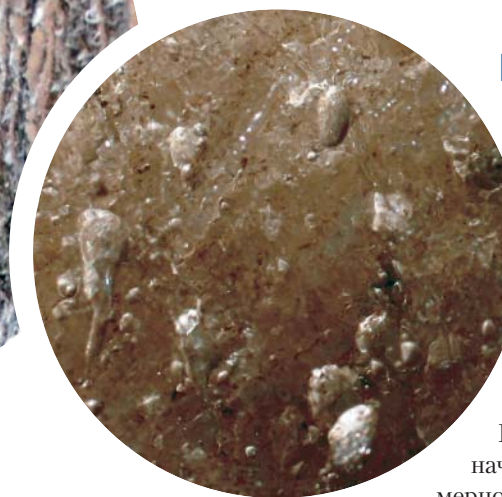
б



а



б

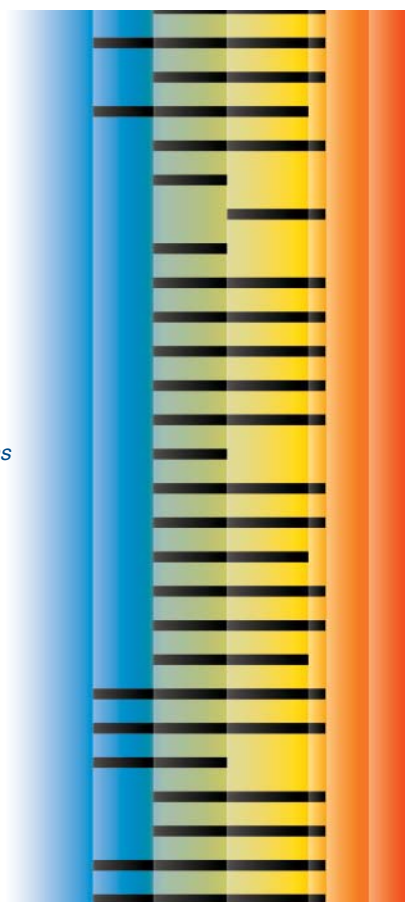


в

Виды микроорганизмов

Градусы (°C) -5 -4 15 2730 37

- Planococcus sp.*
- Planococcus sp.*
- Dietzia daqingensis*
- Rhodococcus sp.*
- Marine bacterium*
- Marine bacterium*
- Frigoribacterium sp.*
- Frigoribacterium sp.*
- Plantibacter sp.*
- Agrococcus jenensis*
- Cryobacterium psychrophilum*
- Curtobacterium sp.*
- Microbacterium sp.*
- Microbacterium hydrocarbonoxydans*
- Bacillaceae bacterium*
- Terrabacter sp.*
- Brevibacterium antiquum*
- Brachybacterium sp.*
- Brachybacterium arcticum*
- Brachybacterium tyrofermentans*
- Arthrobacter sp.*
- Arthrobacter psychrophenicus*
- Arthrobacter sp.*
- Arthrobacter roseus*
- Arthrobacter sulfureus*
- Arthrobacter rhombi*
- Arthrobacter sp.*
- Citricoccus sp.*



Возраст озерного льда из тоннеля Фокс на Аляске (а) — около 25 тыс. лет. Судя по строению льда, содержащего мелкие прожилки (б) и воздушные включения (в), эти ледяные жилы после образования постоянно находились в замороженном состоянии

Слева — график температурной чувствительности микроорганизмов, выделенных из ледяных жил тоннеля Фокс, которая была определена по их способности к размножению при инкубации в разных температурных условиях. Видно, что некоторые из микроорганизмов могут образовывать колонии при отрицательных температурах (Katayama et al., 2007)

В поисках «вечной» жизни

Якутию недаром называют «колыбелью» вечной мерзлоты: практически вся территория республики Саха расположена в зоне многолетнемерзлых пород, толщина которых местами может достигать 500 м и более.

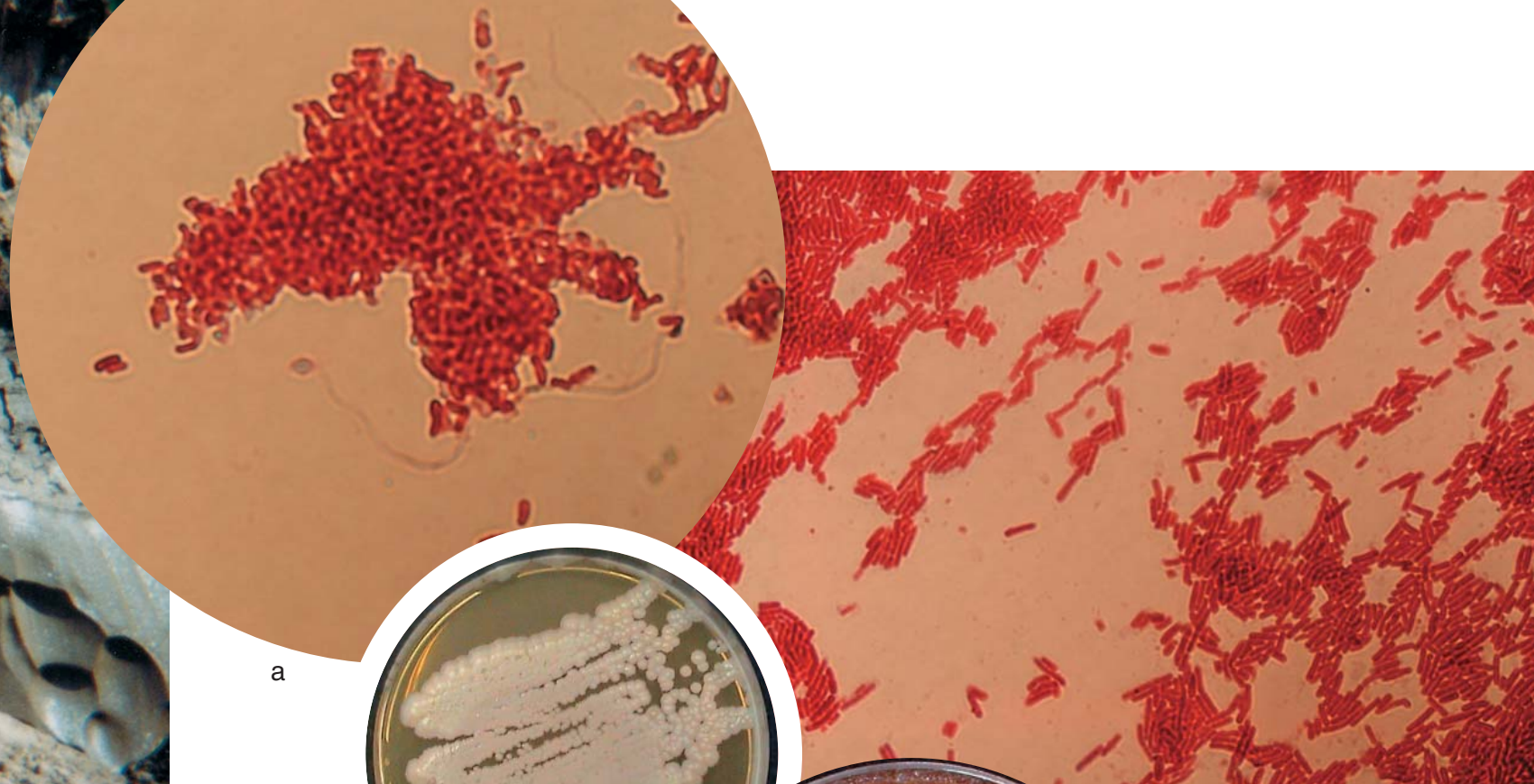
Похолодание в этих местах началось в конце плейстоцена, примерно 3–3,5 млн лет назад. Климат того времени нельзя было назвать жарким: температура января составляла от –12 до –32 °С,

июля — около 12–16 °С выше нуля (Бакулина, Спектор, 2000), благодаря чему отложения в плейстоцене, по видимому, не оттаивали.

Из отложений вечной мерзлоты разных районов Якутии мы отобрали образцы для дальнейшего микробиологического исследования. И вот в пробах мерзлых отложений с Мамонтовой горы возрастом предположительно 2 млн лет была обнаружена бацилла (т. е. бактерия в форме палочки), способная к росту в кислородных и бескислородных условиях.

Известно, что споры бацилл обладают удивительно высокой устойчивостью к экстремальным факторам

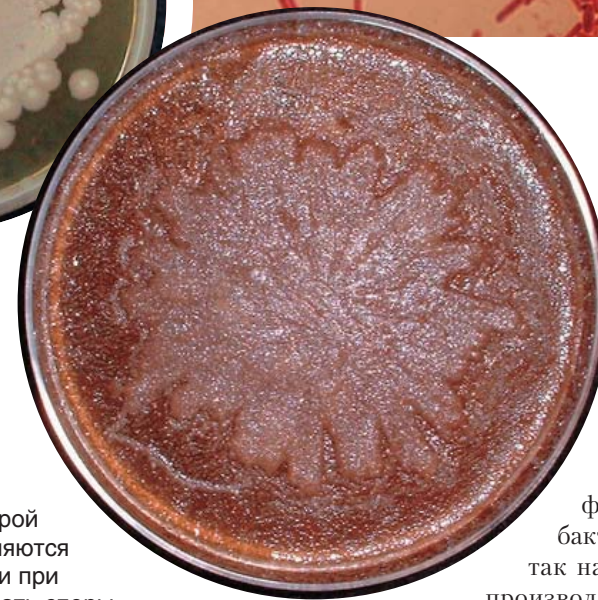
Но, скажет искушенный читатель, чем вы можете доказать, что микроорганизмы сохранились в вечной мерзлоте с древних времен, а не проникли туда извне, совсем недавно? Ведь, казалось бы, этому должно способствовать само строение мерзлых толщ, в которых находятся пленки воды. Однако подобное проникновение возможно лишь в очень засоленных породах, поскольку обычно водные прослойки в мерзлоте при температурах около –3 °С очень тонкие. Их толщина составляет приблизительно 0,01–0,1 мкм, то есть, как правило, меньше размеров самих микроорганизмов (0,3–1,4 мкм и более).



а



б



Мерзлые отложения якутской Мамонтовой горы представляют собой тонкозернистые пески и алевриты, возраст которых соответствует среднему миоцену (более 10 млн лет) (Баранова и др., 1976). Похолодание здесь было отмечено в конце плиоцена, 3—3,5 млн лет назад, следовательно, с данного момента отложения, по-видимому, находились в замороженном состоянии. Подтверждением тому являются плейстоценовые ледяные жилы, которые могли сохранить свою форму только в том случае, если температурные условия резко не менялись. Таким образом, возраст мерзлоты на Мамонтовой горе, вероятно, может достигать 3,5 млн лет

Из образцов мерзлых отложений с Мамонтовой горы, чей возраст предположительно достигает 2 млн лет, была выделена бацилла, представляющая собой сравнительно большую (1—1,5 на 3—6 мкм) палочку (а), клетки которой при содержании в культуре соединяются в цепочки. Бацилла способна расти при температуре -5°C (б) и образовывать споры круглой формы

среды: так, они были найдены в жизнеспособном состоянии в янтаре с абсолютным возрастом 120 млн лет (Poinar, 1992; Sykes, 1997; Greenblatt et al., 2004). Поэтому обнаружение живой бациллы в древней мерзлоте Мамонтовой горы вполне объяснимо. Однако судить о ее жизнедеятельности трудно: может быть, в мерзлоте бацилла сохранилась только в виде спор. Последнее относится и к другим видам микроорганизмов, выделенных из льдов Центральной Якутии и Аляски.

Большинство найденных микроорганизмов оказались способны к росту при низкой температуре

(-5°C), но не росли при высокой ($+30^{\circ}\text{C}$). В образцах из мерзлых отложений Якутии была обнаружена и идентифицирована ДНК археобактерий нескольких групп, так называемых *метаногенов*, производящих в бескислородных условиях метан. Исследование этих

образцов еще не закончено, поэтому не ясно, с чем мы имеем дело: с живыми метаногенами или же с их законсервированными «остатками». Однако во время инкубации этих мерзлых отложений при температуре -5°C наблюдается выделение метана, что может быть результатом жизнедеятельности микроорганизмов. Не исключено, что именно бактерии-метаногены ответственны за большое содержание метана в многолетне-мерзлых отложениях, столь для них характерное.

Таким образом, есть достаточные основания считать, что в мерзлоте — этом естественном «холодильнике» — в большинстве случаев «законсервированы» живые



Обнажение пластовых льдов на Югорском п-ве (Якутия) возрастом около 22 тыс. лет

Вечная мерзлота — арена беспрецедентного естественного отбора, где миллиарды микроскопических живых клеток лишены пищи, пространства для передвижения и размножения. В этих холодных глубинах могли выжить только организмы, обладающие уникальными механизмами поддержания жизнеспособности в течение гигантских периодов времени

микроорганизмы, чей возраст совпадает со временем промерзания отложений (тысячи, а может быть, и миллионы лет). Возникает вопрос: благодаря каким механизмам поддерживается подобное «бессмертие»?

Принято считать, что старение происходит вследствие потери части информации, хранящейся в ДНК. По существу, максимальная продолжительность жизни определяется именно способностью специальных репаративных ферментов организмов «ремонтировать» поврежденные участки ДНК, тем самым предотвращая появление вредных мутаций.

Неустойчивостью отличаются и белки живых клеток. Так, белки мозга крысы распадаются через 32 дня (Битти и др., 1967), период жизни некоторых других белков исчисляется минутами. И хотя максимальный период теплового полураспада некоторых ферментов может достигать 12 тыс. дней (Segal et al., 1969), это все же не тысячи и не миллионы лет!

Существует основанное на экспериментах мнение, что в состоянии анабиоза в организме не происходит никаких химических и биологических реакций (Hinton, 1968). С другой стороны, на клеточные структуры постоянно воздействуют радиация, давление. Сильным разрушающим фактором является также тепловое движение атомов и молекул, поскольку температура обычно далека от абсолютного нуля. Поэтому живой организм

вряд ли может достигнуть при анабиозе, да и вообще в природных условиях, состояния термодинамического равновесия.

Таким образом, до сих пор остается загадкой, благодаря чему некоторые микроорганизмы выживают в тысячелетней мерзлоте. Их уникально долгую жизнь трудно объяснить одним лишь замедлением жизнедеятельности при анабиозе. Должны существовать структурные и биохимические особенности, специальные механизмы восстановления клеточных структур, имеющих склонность к разрушению, которые отличают их от других известных нам организмов.

Понимание принципов действия этих механизмов позволит, по-видимому, радикально изменить взгляд на продолжительность жизни и потенциальные возможности организма, приблизиться к решению ряда фундаментальных проблем, таких как перенос живого вещества в космосе, происхождение земной жизни, а может быть, — и к созданию лекарственных препаратов, увеличивающих продолжительность человеческой жизни.

Холодная «колыбель»

Так изучение древних организмов в мерзлоте непосредственно приводит нас к проблеме появления жизни на Земле. Ныне живущие организмы характеризуются исключительной сложностью на молекулярном уровне, и нужно признать, что до сих пор нет однозначного ответа на вопрос, как они возникли. По образному выражению американского астрофизика Ф. Хойла (которое он употребил в отношении РНК), вероятность синтеза из «первичного бульона» таких сложных биомолекул, как белки и нуклеиновые кислоты, можно сравнить с вероятностью сборки Боинга-747 ураганом, пронесшимся над мусорной свалкой.

Согласно теории панспермии, которая в наши дни становится все более популярной, жизнь могла быть занесена на Землю с других планет. В последнее время благодаря изучению метеоритов и некоторым микробиологическим исследованиям появились данные, хотя

и не бесспорные, которые подтверждают справедливость этой теории.

Действительно, во внешних областях солнечной системы: в спутниках, кометах, на планетах Уран, Нептун и других — содержится в 100 раз больше льда, чем на Земле и присутствуют следы органических молекул. И хотя далекие планеты и кометы проводят большую часть своей «жизни» при температурах ниже -200°C , в прошлом, благодаря радиоактивному распаду, лед мог оттаивать, способствуя появлению условий, пригодных для жизни микроорганизмов. В космическом пространстве, в вакууме и при сверхнизких температурах эти организмы в течение длительного времени могли бы находиться в бездействующем, высушенном и замороженном состоянии, пока не попали бы в благоприятную среду.

Существует, однако, так называемая ультрафиолетовая проблема. Микроорганизмы, путешествующие в космосе, могут быть повреждены ультрафиолетовым и более жестким излучением звезд. Несмотря на то что данные о выживании микроорганизмов при низких температурах, в вакууме, а также при одновременном действии излучения сегодня практически отсутствуют, можно утверждать, что убить микроорганизмы ультрафиолетовым излучением не так просто. Поврежденная при этом генетическая информация может быть затем восстановлена с помощью специальных клеточных механизмов: подобные недавно были обнаружены в бактериальных спорах (Nicholson et al., 2000). Об удивительной стойкости жизни свидетельствуют и результаты недавнего космического эксперимента НАСА, когда значительная часть спор бактерии *Bacillus subtilis*, находившихся под воздействием жесткой солнечной радиации в течение почти 6 (!) лет, сохранила жизнеспособность (Horneck, 1993; Horneck et al., 2001; La Duc et al., 2004). Кроме того, микроорганизмы могут быть защищены от радиации слоем льда или горных пород.

Если все приведенные гипотезы верны, рискнем предположить, что жизнь может иметь более широкое распространение по Вселенной, чем мы привыкли думать. И низкие температуры, ассоциирующиеся в человеческом сознании со смертью, сыграли в этом далеко не последнюю роль.

