

ПОДЗЕМНЫЕ ХРАНИЛИЩА В ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЕ: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ

А.В. Брушков

Тюменский государственный нефтегазовый университет, Тюмень, Россия,
e-mail: brouchkov@hotmail.com

Рассматривается вопрос использования подземных хранилищ в вечной мерзлоте для хранения биологических материалов. Приводится краткое описание наиболее известных подземелий. Описаны результаты микробиологических исследований вечной мерзлоты применительно к проблеме длительного хранения. Естественный температурный режим, особенно в сочетании с дополнительным охлаждением, и исключительная экономичность, по-видимому, позволяют устраивать эффективные хранилища биологических материалов в толще вечной мерзлоты, а также проводить в них биологические эксперименты в течение длительного времени.

Ключевые слова: биологические материалы, вечная мерзлота, криохранилище.

Введение

Несмотря на предположение Анаксагора, сделанное в V в. до н. э. о том, что семена существуют «всегда и везде», проблема долгосрочного сохранения жизнеспособности биологических материалов не только остается актуальной, но приобретает остроту. Начиная с фундаментальных вопросов происхождения жизни и переноса ее с других планет и заканчивая проблемами хранения запасов продовольствия и генетического материала современная наука сталкивается с необходимостью обоснования длительных условий хранения и требований к соответствующим инженерным сооружениям. О максимальной продолжительности жизни семян известно недостаточно. До сих пор неизвестно, например, могут ли микроорганизмы, споры и семена переживать в течение многих лет условия космоса. Один из отцов современной биологии Ф. Крик в 1973 г. поддержал идею «направленной панспермии» с других планет, но она является недоказанной гипотезой. Только недавно получены результаты, касающиеся выживания микроорганизмов в тысячелетней мерзлоте. Правда, механизм такого длительного выживания остается неизвестным. Представляют важное практическое значение разработка

методики и хранение генетических коллекций уникального сибирского и других генофондов возделываемых растений. Возникает очевидная необходимость использования естественных ресурсов нашей страны и разработки технологии долгосрочного хранения в вечной мерзлоте Сибири и Якутии, обеспечивающей жизнеспособность и сохранность коллекций для будущих поколений. Такие хранилища могут использовать уже существующие сооружения, например, подземелья в Ямбурге (Тюменская область), Амдерме (Архангельская область) и Якутске (Республика Саха). Такие хранилища считаются перспективными для сохранности генофондов растений. Так, недавно построено хранилище в вечной мерзлоте на Шпицбергене, закрытое для легитимного доступа российских исследователей. Актуальной представляется реорганизация инфраструктуры хранения генофондов сельскохозяйственных растений в РФ и создание на базе институтов СО РАН и СО РАСХН проекта национальной программы долгосрочного хранения генофонда растений в вечной мерзлоте. При этом, как известно, ИЦиГ СО РАН и СибНИИРС СО РАСХН обладают крупнейшими генетическими банками, уступающими лишь банкам университета Киото (Япония) и китайским учреждениям.

Россия имеет не только наибольшую в мире территорию, но и наибольшую территорию вечной мерзлоты, которая занимает около 3/4 территории. Кроме того, мерзлота практически не проницаема ни для жидкостей, ни для газов. Поэтому очевидно стремление использовать этот запас естественного холода для длительного хранения живых биологических материалов. При этом можно обойтись минимальным количеством обслуживающего персонала. Подземные хранилища – вовсе не новая идея. Сегодня, например, Федеральное агентство по госрезервам имеет около 150 подземных хранилищ на территории России, в том числе по некоторым открытым публикациям, и в северной зоне. Как известно, Россия пока отказалась от планов захоронения радиоактивных отходов в вечной мерзлоте Новой Земли. Проекты строительства хранилищ для твердых радиоактивных отходов в вечной мерзлоте, по сообщениям печати, отвергнуты в основном по соображениям безопасности и надежности. В альтернативных мерзлоте гранитных массивах исключена возможность оттаивания под влиянием выделяющегося тепла. При этом естественные низкие температуры, стабильность которых, как правило, выше, чем в искусственных холодильниках, наоборот, благоприятны для сохранения биологических материалов или проведения длительных экспериментов.

Хранилища в вечной мерзлоте

Как известно, еще в 1900 г. русский исследователь Арктики Э. Толль создал в мерзлоте на Таймыре склады с продовольствием для будущей экспедиции. Одним из них никто не воспользовался, и при его современном обследовании выяснилось, что мучные продукты, печенье, шоколад и консервы находятся в удовлетворительном состоянии и пригодны к употреблению. В России имеется несколько подземелий в вечной мерзлоте, пригодных для возможного длительного хранения биологических материалов. Особенностью мерзлоты является то, что сезонные колебания температуры затухают на глубине 10–15 м, поэтому на большей глубине температура мерзлоты постоянна в пределах около $\pm 0,1$ °С.

Бывшая Амдерминская мерзлотная станция (АНИМС, ранее НИМЛ Главсевморпути и

ЛенЗНИИЭП) располагала бывшей разведочной флюоритовой шахтой на глубине около 14 м в толще докембрийских известняков со среднегодовой температурой около -4 °С. Сейчас шахта находится в ведении Кольского филиала РАН. Только ее очень небольшая часть используется для сейсмических наблюдений. Длина подземных коридоров составляет около 200 м, помещение сухое, почти не содержит льда. Шахта оборудована лестницей, подъемником, электрической сетью, защищена надстройкой на поверхности.

В Якутске находится заметно меньшее (около 30 м) по размерам подземелье с приблизительно теми же температурой и глубиной в песчаных отложениях под зданием Института мерзлотоведения СО РАН им. П.И. Мельникова. Там расположен музей и проводятся исследования (рис. 1). В верхнюю часть помещений в некоторые годы поступают грунтовые воды, правда, в небольшом количестве.

Этому же институту принадлежала Игарская подземная лаборатория, которая сейчас превращена в муниципальный музей. Однако она еще меньше якутской, поэтому едва ли пригодна для хранения значительных по объему коллекций биоматериалов и представляет интерес, возможно, только для исследований.

Существуют хранилища в вечной мерзлоте с довольно низкими температурами для хранения продуктов, преимущественно рыбы, в Хатанге, в Русском Устье и других местах. Одно из крупных хранилищ находится в г. Ямбурге (рис. 2). Создавали его для хранения продуктов планируемого 30-тысячного города, но город не построили, а хранилище осталось. Оно находится на сравнительно небольшой глубине, поэтому температуры там, вероятно, не постоянны, но довольно низки, возможно, ниже -5 °С.

Среди зарубежных хранилищ можно упомянуть неглубокий (несколько метров) тоннель Фокс в песчаных отложениях на Аляске, с температурами около $-3-4$ °С. Тоннель принадлежит министерству обороны США. Вблизи Фербенкса также находятся несколько старых шахт по добыче золота протяженностью десятки метров в мерзлых песчано-галечных отложениях.

В Норвегии недавно закончено строительство хранилища на архипелаге Шпицберген,



Рис. 1. Подземелье Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН в Якутске.

в котором на случай глобальной катастрофы будут храниться семена растений. Хранилище расположено в горном массиве, в вечной мерзлоте, но охлаждается искусственно до $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$. Идея его создания заключается в том, что условия удаленного района с низкой естественной температурой (около $-3,5\text{ }^{\circ}\text{C}$) могут обеспечить защиту генетического фонда в случае глобальной катастрофы или войны. Кроме того, надежность поддержания низкой температуры не может сравниться ни с какими искусственными условиями даже в настоящее время, когда существует возможность отказов и отключений, или обычного недостатка финансирования. Ожидается, что в норвежском хранилище будут собраны семена со всего мира, около трех миллионов образцов. Стоимость проекта Международного арктического генетического банка около 10 млн долларов, причем финансирует его правительство Норвегии. По сообщениям, образцы наиболее важных сельскохозяйственных культур (500 семян каждого образца) по мере поступления будут запаяны в

алюминиевые пакеты размером $26,5 \times 9\text{ см}$ и заложены в коробки размером $60 \times 40 \times 28\text{ см}$. Коробки размещаются на полках в 4 ряда. Образцы семян хранятся в трех отсеках, а внутренние размеры всего хранилища $16,5 \times 53,8 \times 6,2\text{ метра}$.

Как известно, Всероссийский научно-исследовательский институт растениеводства имени Н.И. Вавилова в С.-Петербурге в свое время предполагал построить аналогичное хранилище в условиях вечной мерзлоты в Якутии. Но во время реформ 1990-х годов эти работы пришлось свернуть. По сообщениям прессы, американцы построили свой банк в горах Колорадо в 1956 г., а наш генбанк, построенный в 1976 г., был устроен на Кубани. Россия – одно из государств, которое обладает собственной уникальной коллекцией семян. Она была собрана в основном, ВНИИ растениеводства им. Н.И. Вавилова (около 300 тысяч образцов, относящихся более чем к 2 тыс. видов), но и другие российские организации, в частности, в Сибири, располагают значительными коллекциями.

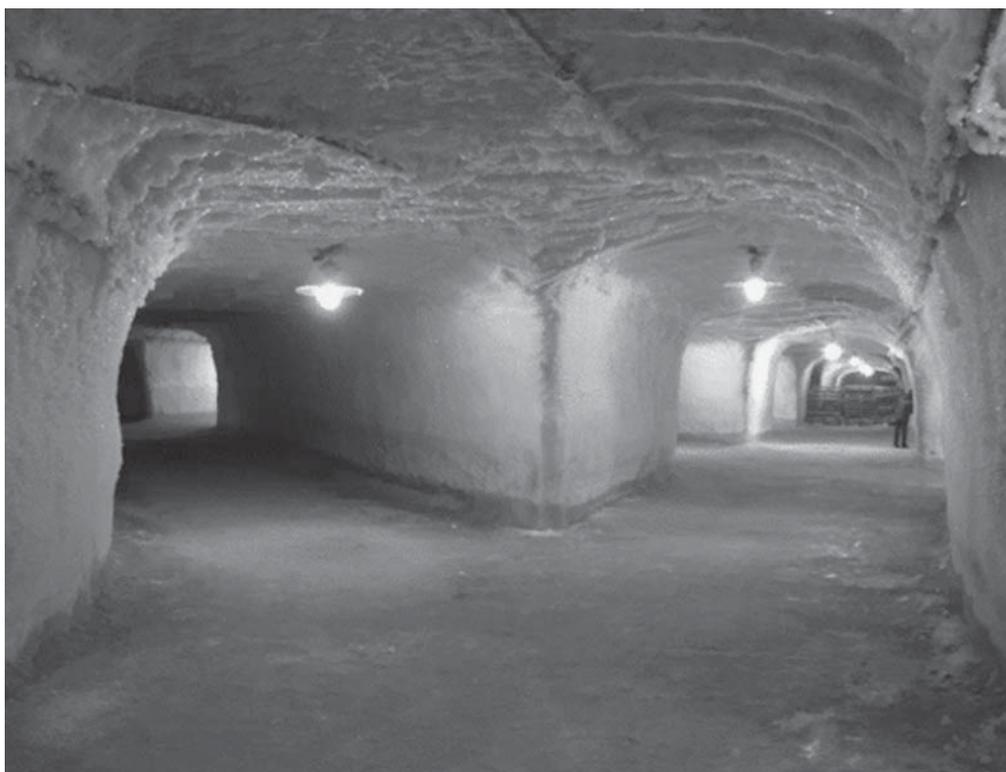


Рис. 2. Подземное хранилище в Ямбурге, Тюменская область.

Жизнь в мерзлоте

С точки зрения эффективного сохранения семян растений в вечной мерзлоте важно изучение вопросов жизнедеятельности микроорганизмов при низких температурах. Биологическим проблемам криолитогенеза, как и литогенеза вообще, к сожалению, уделяется неоправданно мало внимания. Так как большая часть земной поверхности имеет температуру ниже 5°C , способность клеток к существованию при низких температурах имеет важное значение для их выживания (Morita, 1975). Первые свидетельства жизнеспособности микроорганизмов в мерзлоте появились в XIX столетии. Изучение мерзлых морских осадков с полуострова Ямал, выполненное автором летом 1999 г., подтвердило такую способность. Эти отложения не таяли в течение по крайней мере последних 40 тыс. лет и имели среднюю температуру около -4°C . С.С. Абызов с соавт. (1979) обнаружили во льду на антарктической станции «Восток» бактерии, грибы, диатомеи и другие микроор-

ганизмы. Цианобактерии были найдены в антарктическом ледяном щите на глубине 3600 м, их возраст соответствует возрасту льда на этой глубине и составляет около 500 тыс. лет. Рост выделенных штаммов происходит при широком диапазоне температуры от 4 до 50°C . Большинство микроорганизмов не размножается при температурах ниже 0°C . Хотя, как это было установлено впервые еще в 1887 г. Фостером, имеются бактерии, способные к росту при отрицательных температурах. Метаболизм бактерий в вечной мерзлоте был отмечен при температурах около -20°C (Friedmann, 1994). Имеются факты относительно роста бактерий ниже 0°C (Clein, Schimel, 1995). Ферменты также активны в почвах при температуре -20°C . Некоторые дрожжи растут при температурах ниже 0°C . Вода внутри клеток не замерзает иногда и при температуре -20°C , что было установлено для *Mytilus edulis* (Kanwisher, 1955). В настоящее время проблема развития бактерий при отрицательных температурах еще далека от своего разрешения. Считается, что клетки

микроорганизмов имеют ряд органических криопротекторов и используют специальные механизмы, чтобы защитить себя от ледяной кристаллизации. Это позволяет им выжить в течение нескольких лет в переохлажденном состоянии. Таким образом, сегодня имеется ряд доказательств, что некоторые микроорганизмы, сохраняющиеся во льду и вечной мерзлоте в течение длительного времени, могут не только находиться в анабиотическом состоянии, но и продолжать свою жизнедеятельность.

Для исследования микроорганизмов в мерзлых породах нами были отобраны образцы из обнажений и подземных сооружений в нескольких районах. Одно из них расположено на левом берегу реки Алдан, в 325 км вверх по течению от ее впадения в реку Лену, на Мамонтовой горе. Образцы были отобраны на глубине 0,9–1 м ниже слоя сезонного оттаивания. Обнажение разрушается рекой (более 10–15 см в год), так что отложения, из которых отбирались образцы, находились, очевидно, в многолетнемерзлом состоянии. Они представляют собой тонкозернистые пески и алевролиты; их возраст соответствует среднему миоцену. Похолодание началось здесь в конце плиоцена, около 3–3,5 млн лет тому назад. Температура в январе для этой территории была оценена Н.Т. Бакулиной и В.Б. Спектором (2000) от –12 до –32 °С, а в июле от +12 до +16 °С. Отложения, по-видимому, не оттаивали в плейстоцене из-за холодного климата Якутии. Таким образом, возраст мерзлоты на Мамонтовой горе, вероятно, может достигать 3,5 млн лет. Кроме того, были отобраны образцы из повторно-жильных льдов как в Якутии, так и на Аляске: в тоннеле Фокс и в золотой шахте вблизи Фербенкса. Были также исследованы стенки подземелья Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова в Якутске.

На Мамонтовой горе в мерзлых миоценовых отложениях была найдена бацилла, способная к аэробному и анаэробному росту в различных средах; оптимальная температура роста +37 °С. Она также росла при –5 °С. Бацилла представляет собой сравнительно большую (1–1,5 × 3–6 микрон) палочку, которая в культуре соединяется в цепи и способна образовывать споры круглой формы. Она неподвижна и обладает гемолитической активностью. При температуре –5 °С бацилла росла как в замороженной, так и в пе-

реохлажденной среде. Родственные виды включают *Bacillus simplex*, *B. macroides* и другие. Последовательность нового бактериального гена rRNA 16S из образцов Мамонтовой горы была депонирована в DDBJ/EMBL/GeneBank под номером AB178889, идентификационный номер 20040510203204.24251. Рост бацилл при низких температурах наблюдался исследователями и ранее (Ashcroft, 2000); известно, например, что *Bacillus anthracis* легко переносит замораживание. Однако оптимальная температура роста найденной бациллы довольно высока. Несмотря на то, что она может расти и при температуре ниже нуля, колоний на отобранных образцах не наблюдалось. Споры бацилл известны как наиболее резистентные (Nicholson *et al.*, 2000); так, они были найдены в янтаре с абсолютным возрастом 120 млн лет. Поэтому находка живой бациллы в древней мерзлоте Мамонтовой горы в целом не удивительна. Насколько активна ее жизнь в мерзлоте, однако, неясно; это относится и к микроорганизмам, выделенным из льдов Центральной Якутии и Аляски.

Из повторно-жильных льдов Якутии и Аляски было выделено несколько видов микроорганизмов. Многие из выделенных бактерий грамположительны и близки к *Arthrobacter* и *Micrococcus* spp., а грибы – к *Geomyces* sp. Большинство изолятов оказались способны к росту при –5 °С, но не росли при +30 °С.

В подземелье Института мерзлотоведения им. П.А. Мельникова в Якутске, на глубине около 7 м на стенах был найден белый грибной мицелий. Похожий мицелий наблюдается и на стенках тоннеля Фокс на Аляске. Идентификация выделенного вида (штамм PF) была основана на его морфологических характеристиках и анализе последовательности нуклеотидов 18S rRNA; он близок к *Penicillium echinulatum* и, возможно, представляет собой новый вид. Образцы из мерзлых отложений были подготовлены вместе с образцами штаммов *P. echinulatum*, полученных из банка культур, и инкубированы при температурах +25 °С, +5 °С и –5 °С. Характеристики прорастания спор и роста штамма PF из мерзлых отложений и штаммов IFO 7760 и IFO 7753 *P. echinulatum* при более низких температурах оказались различными: штамм PF сравнительно быстро рос при –5 °С (рис. 3). Выделенный штамм, близкий к *P. echinulatum*,



Рис. 3. Рост гриба *Penicillium* spp. при -5°C .

в подземелье Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова в Якутске несмотря на его адаптацию к холоду и условиям питания вполне может быть современным, занесенным с поверхности. Кроме того, этот гриб растет только в аэробных условиях. Поэтому и его способность к росту в мерзлоте сомнительна, но в условиях подземелья он вполне жизнеспособен.

Заключение

Таким образом, вопрос использования подземных хранилищ в вечной мерзлоте для хранения биологических материалов представляется перспективным, но требует дополнительных исследований. На возможность использования подземных хранилищ в мерзлоте неоднократно указывали специалисты-мерзлотоведы, в частности академик П.И. Мельников (1945, 1962). В настоящем обзоре приведено лишь краткое описание наиболее известных подземелий. Результаты микробиологических исследований вечной мерзлоты показывают, что, с одной стороны, живые клетки (по крайней мере, простейших эукариот и бактериальные) способны сохраняться чрезвычайно долго даже при сравнительно высоких отрицательных температурах около -5°C . С другой стороны, способность бактерий

и грибов к росту при таких температурах может служить препятствием для хранения семян. Понизить температуру мерзлоты с помощью постоянно действующих автоматических установок, например, так называемых сезонно-действующих устройств, легко и сравнительно недорого. Естественный температурный режим, особенно в сочетании с дополнительным охлаждением, и исключительная экономичность, по-видимому, позволяют устраивать эффективные хранилища биологических материалов в толще вечной мерзлоты, а также проводить в них биологические эксперименты в течение длительного времени.

Литература

- Абызов С.С., Бобин Н.Е., Кудряшов Б.Б. Микробиологические исследования ледника в Центральной Антарктиде // Изв. АН СССР. Сер. биол. 1979. № 6. С. 828–836.
- Бакулина Н.Т., Спектор В.Б. Реконструкция климатических параметров неогена Якутии по палинологическим данным // Климат и мерзлота / Ред. Г.Н. Максимов, А.Н.Федоров. Якутск: Ин-т мерзлотоведения, 2000. С. 21–32.
- Мельников П.И. Вечное хранилище // Наука и жизнь. 1945. № 6.
- Мельников П.И. Об изменениях температуры горных пород за вековой период в шахте Шергина в г. Якутске и продолжительности тепловых процессов при восстановлении нарушенных температур мерзлых горных пород. Многолетнемерзлые породы и сопутствующие им явления на территории Якутской АССР. М.: Изд-во АН СССР, 1962. С. 54–67.
- Ashcroft F. Life at the Extremes. Harper Collins, 2000. 326 p.
- Friedmann E.I. Permafrost as microbial habitat // Viable Microorganisms in Permafrost. Pushchino: Russian Academy of Sciences, 1994. P. 21–26.
- Clein J.S., Schimel J.P. Microbial activity of tundra and taiga soils at sub-zero temperatures // Soil Biol. Biochem. 1995. V. 27. P. 1231–1234.
- Kanwisher J. Freezing in intertidal animals // Biol. Bull. 1955. V. 109. P. 56–63.
- Morita R.Y. Psychrophilic bacteria // Bacteriol. Rev. 1975. V. 39. P. 144–167.
- Nicholson W.L., Munakata N., Horneck G. *et al.* Resistance of *Bacillus* endospores to extreme terrestrial and extraterrestrial environments // Microbiol. Mol. Biol. Rev. 2000. V. 64. P. 548–572.

UNDERGROUND STORAGE IN PERMAFROST: A REVIEW

A. Brouchkov

Tyumen State Oil and Gas University, Tyumen, Russia, e-mail: brouchkov@hotmail.com

Summary

Underground mines in permafrost are considered for storage of biological materials. Short sketch of existing mines is given. Results of microbiological research in permafrost in relation to the problem of long term storage are described. Natural temperature mode, especially in combination with artificial chilling, and exceptional low cost make underground mines in permafrost efficient for storage of biological materials and experiments.