

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ КРИОЛОГИИ ЗЕМЛИ

УДК 167; 550.36

**НОВЕЙШИЕ ЯВЛЕНИЯ, КОНЦЕПЦИИ, ИНСТРУМЕНТАРИЙ  
КАК ФУНДАМЕНТ ДЛЯ СТАРТА К НОВЫМ ГОРИЗОНТАМ КРИОЛОГИИ**

**В.П. Мельников**

*Институт криосферы Земли СО РАН, 625000, Тюмень, а/я 1230, Россия; melnikov@ikz.ru  
Тюменский государственный нефтегазовый университет, 625000, Тюмень, ул. Володарского, 38, Россия*

Все возрастающий масштаб физических и физико-химических исследований криогенных явлений существенно расширил рамки представлений о роли льда, снега и льдоподобных образований в Солнечной системе. На основе системных знаний о холодном мире намечены некоторые перспективы развития предмета криологических исследований с учетом современных достижений в области создания моделей межмолекулярных взаимодействий в воде, льду и газовых гидратах, а также расширения временных границ существования их метастабильного состояния. Обоснована необходимость дальнейшего изучения воздействия капельных кластеров на холодные слои атмосферы и возможности использования “сухой воды” в новых технологиях транспортировки газа. В развитие идей В.И. Вернадского о связях явлений и процессов в планетарной оболочке Земли с живым веществом обозначена перспектива исследований микробиоты из мерзлоты для улучшения качества современных биосистем.

*Лед, метастабильные газовые гидраты, капельные кластеры, “сухая вода”, ледяной смерч, криогенные ресурсы, палеобиота, геомедицина*

**RECENT DISCOVERIES, THEORIES, AND TOOLS:  
MAKING A START TOWARD NEW PROSPECTS IN CRYOLOGY**

**V.P. Melnikov**

*Earth Cryosphere Institute, SB RAS, 625000, Tyumen, P/O box 1230, Russia; melnikov@ikz.ru  
Tyumen State Oil and Gas University, 625000, Tyumen, Volodarskogo str., 38, Russia*

The increasingly growing research in physics and chemistry of cryogenic phenomena has extended the bounds of understanding the role of ice, snow, and ice-like structures in the Solar System. In this paper, some prospects in cryology are outlined proceeding from the gained systematic knowledge of the cold world. This knowledge is due to recent advances in modeling molecular interaction in water, ice, and gas hydrates, as well as to new models of gas hydrates implying their long existence in metastable states at negative temperatures. It is necessary to continue studying the effects of drop clusters on cold upper atmosphere and the possibilities for using “dry water” in new technologies of gas transportation and storage. As an extension of ideas by Vladimir Vernadsky on links between life and different Earth’s spheres (atmosphere, hydrosphere, cryosphere), new avenues are also opening in the research of viable paleobiota isolated from permafrost to improve the extant biological systems.

*Ice, metastable gas hydrates, drop clusters, “dry water”, brinicle, resources of permafrost, paleobiota, geo-medicine*

Познавательный и практический интерес к сокровищам Арктики и Антарктики повысил значимость исследований криосферы Земли, а значит, и требования к криологическому сообществу, обязанному отвечать на различные вопросы, возникающие при продвижении человека в высокие широты. Их сложность не позволяет оставаться в рамках традиционных подходов геолого-геогра-

фического направления, изучать только некоторые из многих компонентов криосферы. В последние десятилетия в сферу наших исследований прочно вошли проекты физико-химического, физического, астрономического, информационного и биологического содержания. По существу, углубляя наши знания о криосфере, мы наводим мосты между отдельными естественно-научными дис-

циплинами, что необходимо прежде всего для создания синтетической конструкции данного объекта в широком диапазоне пространственно-временных параметров. Первым такую синтетическую конструкцию создал В.И. Вернадский и назвал ее биогеохимией, показав, что всем обликом Земли, структурой ее атмосферы, гидросферы и, естественно, криосферы мы обязаны жизни в ее разносторонних проявлениях.

### В глубины ледового вещества

Сегодня, исследуя такие проблемы, как “климат и мерзлота”, “потепление–похолодание”, “климатические модели”, “криогенез в атмосфере”, мы вынуждены рассматривать взаимосвязь явлений и процессов в верхних горизонтах криосферы (т. е. в отрицательно-температурных слоях тропосферы и стратосферы) с процессами в литосфере, ее криолитозоне и в традиционно гляциологических объектах – льдах во всех их проявлениях.

При натиске обширной информации, в частности получаемой непосредственно из космоса, о широчайшем распространении льда на планетах и их спутниках, о разнообразии фазовых состояний и химического состава льда в Солнечной системе и за ее пределами удивительно устойчивыми остаются простейшие представления о льде как твердом агрегатном состоянии воды. Из справочников и учебников, из литературных произведений в наше подсознание прочно внедрилось отношение к воде и льду как единому веществу. При этом алмаз, графит и сажа в нашем представлении различаются, хотя это один химический элемент – углерод.

В настоящее время мы вновь вернулись к рассмотрению льда как самостоятельного объекта,

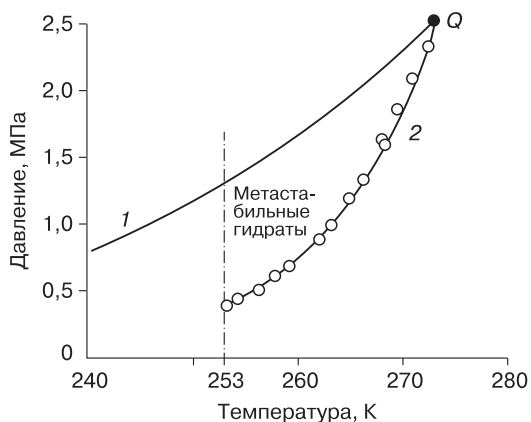
изучая различные его функции и роль в природе [Мельников, Геннадиев, 2011].

Рост интереса к исследованию льда и газовых гидратов связан не только с тем, что они являются образцом трансформируемых состояний и источниками энергии, но и с активным использованием льда в современных нанотехнологиях. Так, специалистами Гарвардского университета разработана ледовая нанолитография, включающая создание, использование и удаление тонких слоев льда на поверхности углеродных нанотрубок.

Разрабатываются эффективные модели межмолекулярных взаимодействий, изучаются свойства газогидратных каркасов, наноструктур газогидратного типа в свете появившейся потребности в хранении больших запасов водорода в водородной энергетике, необходимости транспортировки и хранения значительных объемов газа [Киров, 2011].

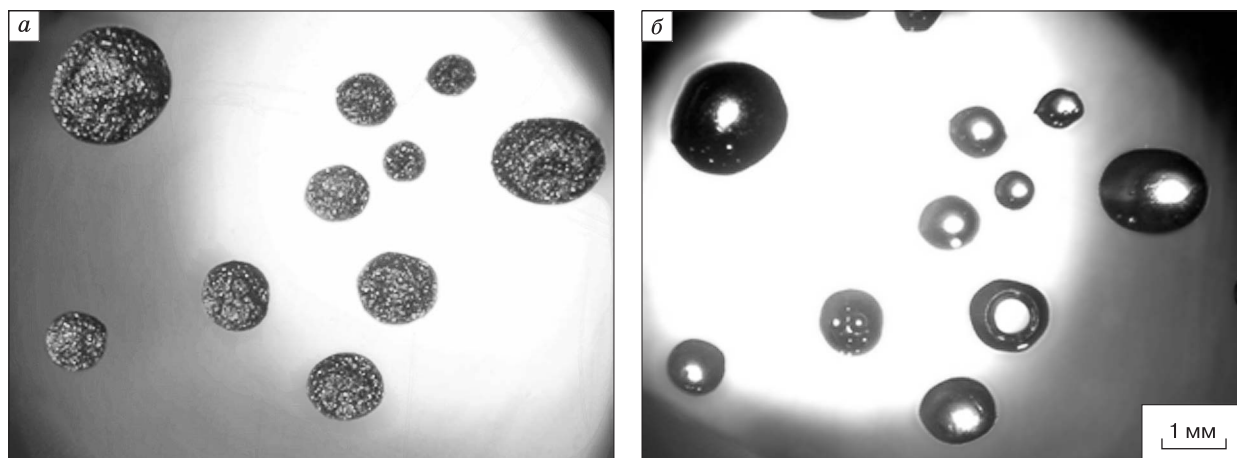
Впервые получен результат, доказывающий возможность длительного существования при отрицательных температурах метастабильных газовых гидратов [Мельников и др., 2011], устойчивость которых не связана с известным эффектом их самоконсервации [Истомин, 1992]. Определены термобарические границы существования таких гидратов (рис. 1). Получены экспериментальные доказательства диссоциации метастабильных гидратов на переохлажденную воду и газ (рис. 2). Это серьезный шаг в понимании механизмов развития неустойчивых геологических образований, которыми являются газовые гидраты при изменении термодинамических условий среды. Становится более понятным происхождение реликтовых газовых гидратов в мерзлоте и в целом природная цикличность возникновения и исчезновения скопленений этого полезного ископаемого.

В Институте криосферы Земли СО РАН получены такие новейшие результаты, как рост скорости коррозии металлов на контакте со льдом [Шавлов и др., 2011б] и “сухая вода”, кратно увеличивающая скорость образования газовых гидратов по сравнению с “объемной водой” и молотым льдом (рис. 3) [Поденко и др., 2011]. Хочется надеяться, что эти результаты не только привлекут внимание практиков – строителей и химиков-технологов, но и впишут новые страницы в концепцию геологической эволюции Земли, позволяет по-новому осветить жизнь нашей планеты в ледниковые периоды. Области возможного применения “сухой воды” в газогидратных технологиях: транспортирование и хранение природного газа в форме гидратов, промышленное разделение газовых смесей, утилизация парниковых газов, использование в качестве модельной системы при изучении метастабильных фазовых состояний воды.



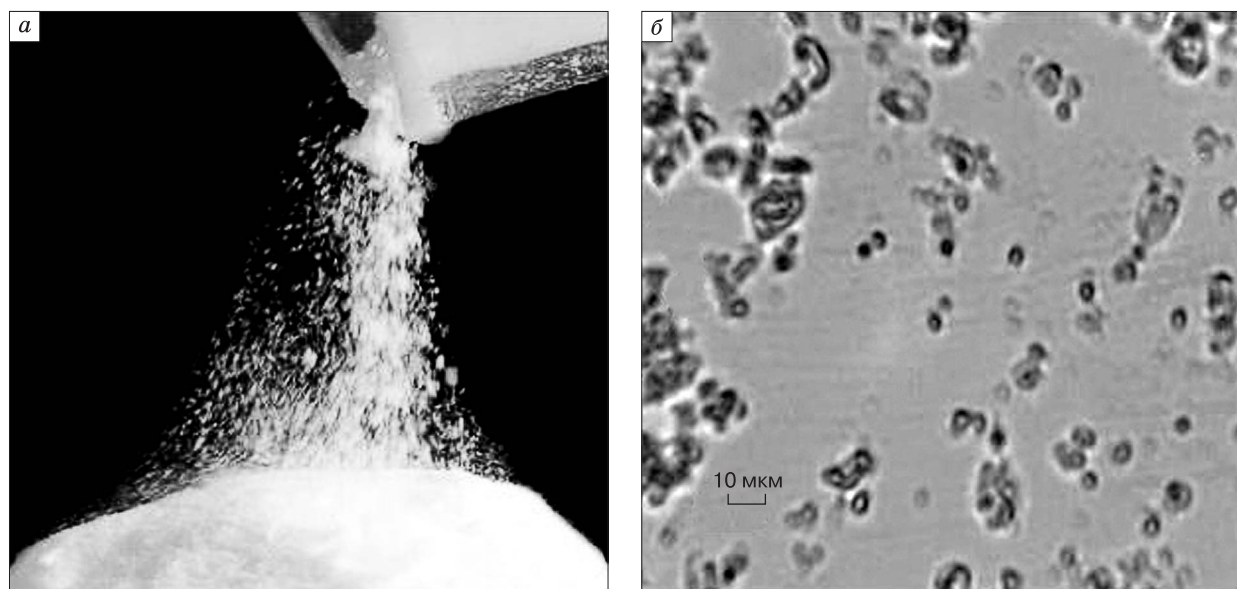
**Рис. 1. Область существования метастабильных гидратов метана.**

1 – линия равновесия “лед–гидрат–газ”; 2 – линия метастабильного равновесия “переохлажденная вода–гидрат–газ” (точки – экспериментальные данные); Q – квадрупольная точка равновесного существования четырех фаз (лед–гидрат–вода–газ).



**Рис. 2.** Диссоциация гидратов природных газов.

*a* – метастабильные гидраты метана; *б* – их диссоциация при пересечении линии метастабильного равновесия “переохлажденная вода–гидрат–газ” (давление в реакторе снижено с 1,9 до 1,6 МПа, давление при диссоциации 2,17 МПа, температура 268 К).



**Рис. 3.** Простая геометрия микрокапель воды и наличие прямого контакта поверхности микрокапель с газовой фазой.

*a* – фотография “сухой воды”, выполненная в лаборатории ЯМР ИКЗ СО РАН; *б* – изображение “сухой воды”, полученное с помощью оптического микроскопа.

### Криогенные ресурсы геосфер

Когда речь заходит о природных богатствах России, то Сибирский регион оказывается вне конкуренции. За редким исключением, на долю Сибири в запасах того или иного полезного ископаемого приходится свыше 70 %. Мерзлотоведы могут похвастаться тем, что и криогенного ресурса в Сибири более 70 %. Однако отношение к нему еще не сформировано, его многоликость не отражена в энциклопедиях.

Что же это за ресурс? Прежде всего это часть исчерпаемого и невозобновимого (по В.М. Котлякову [2006]) ресурса под названием “территория”. При этом средоформирующая функция криогенного компонента оказывается, по существу, фундаментальной. Речь идет о мерзлоте, подземных, наземных и покровных льдах. Представьте себе, что подземные пластовые льды Ямала и мерзлота вдруг исчезли, как предсказывают сторонники глобального потепления. Большая часть террито-

риального ресурса уйдет под воду. Но средообразующая функция криогенного ресурса может быть и экстерриториальной. У Антарктиды и Гренландии в этом отношении нет конкурентов (если пренебречь покровными оледенениями в ледниковые периоды).

Известно, что оледенение Антарктиды носит аperiодический характер: баланс антарктического льда всегда положителен [Моисеев, 1984]. Теряет свой лед она практически только за счет откалывания айсбергов.

Антарктида – это грандиозный насос, выкачивающий воду из Мирового океана, тем самым понижая его уровень. Больше всего страдает от этого Австралия, где формируется аридный климат и развивается каменистая пустыня (качество ее территориального ресурса ухудшается).

Можно считать, что речной лед также обладает экстерриториальной функцией – во время ле-

дохода, формируя русло и меняя ландшафты вдоль реки. Криогенные ресурсы составляют значительную часть вещественно-энергетических ресурсов атмосферы, гидросферы, литосферы, педосферы и биосферы, а также часть экологических природных ресурсов.

Давно назрела необходимость при осуществлении экономических проектов в криолитозоне оценивать риски хозяйственной деятельности и закладывать мероприятия по сохранению средоформирующего криогенного ресурса в будущем.

### Новые механизмы теплопереноса

Особого внимания заслуживают явления, влияние которых на криосферу Земли и законы ее формирования еще мало изучены. В пространственно-временном масштабе разных областей знаний о криосфере часть таких явлений оказывается вне общепринятых рамок (рис. 4). Рассмотрим их подробнее.

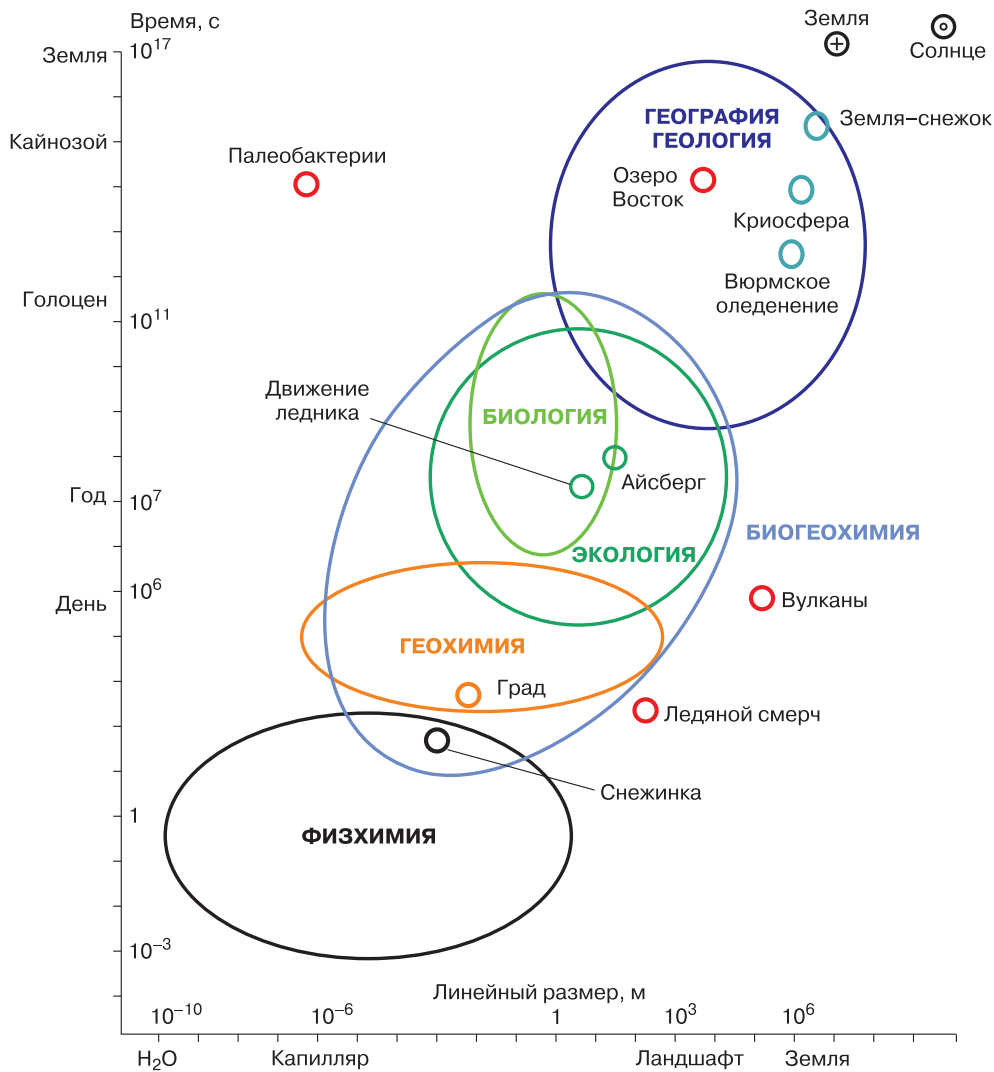


Рис. 4. Пример предметно-объектных распределений во времени и пространстве.



*Ледяной смерч.* Огромный интерес вызвала информация о так называемом ice finger of death, или brinpl, ледяном смерче. Во время образования морского льда при понижении температуры воздуха происходит выделение  $\text{CO}_2$  в атмосферу, связанное с разложением гидрокарбоната кальция на  $\text{CO}_2$  и  $\text{CaCO}_3$ . Холодный рассол, устремляясь вниз, создает в отрицательно-температурной воде нечто похожее на ледяной смерч, опускающийся до дна и образующий ледяную “дорожку”, в которую вмораживает морская живность (рис. 5) [BBC Nature..., 2011].

Это явление аномальной кристаллизации морской воды ранее не учитывалось в моделях теплопереноса, в которых толща воды между дном и поверхностным льдом принималась за однородный слой. Для нас это прежде всего дополнительный источник холода, влияющий на параметры субаквальной мерзлоты, а также регулятор циркуляции потоков в морях Арктики и Антарктики.

*Вулканы.* Очевидно, что воздействие мантийных процессов на криосферу происходит через вулканические извержения. Потоки горячей пыли и водяных паров со скоростью современного пассажирского самолета прорывают тропосферу и стратосферу за 15–20 минут, пронизывая при этом и два отрицательно-температурных слоя. После недавней паники, вызванной обнаружением озоновых дыр, появились работы, в которых влияние вулканических аэрозолей на толщину озонового слоя отнесено в основном на счет действия соединений хлора. Тюменскими учеными в последние

годы ведутся исследования нового явления – стремления капель воды в водных аэрозолях к образованию пространственно упорядоченных структур. Оказалось, что эти структуры обладают поверхностным натяжением и вязкостью, превышающей вязкость воздуха [Шавлов и др., 2011a]. Напомню, что значительно раньше была обнаружена способность мельчайших частиц пыли структурироваться в кластеры.

Таким образом, при извержении вулканов происходит мощнейшее воздействие на криосферу новообразованиями в виде пылевых и капельных кластеров, формирующих устойчивые пограничные слои в высоких слоях атмосферы, меняющих кинетику переноса тепла и массы, влияющих на погоду и климат.

Структурированные аэрозоли способствуют появлению озоновых дыр. За счет образования капельных кластеров аэрозольные облака с сернокислым компонентом, разрушающим озон, приобретают стабильность и более длительное время существования, усугубляя тем самым негативное воздействие на озоновый слой.

Так открытие капельных кластеров тюменскими учеными в 2004 г. [Федорец, 2004] демонстрирует новые механизмы образования потоков тепла и массы в тропосфере и стратосфере и циркуляции в атмосфере.

*Озеро Восток.* 5 февраля 2012 г. реализован сложнейший многолетний технологический проект – в Антарктиде на оз. Восток сквозь толщу льда пробурена скважина и с глубины 4 км взяты пробы воды. Анализ этих проб – углубление в ис-

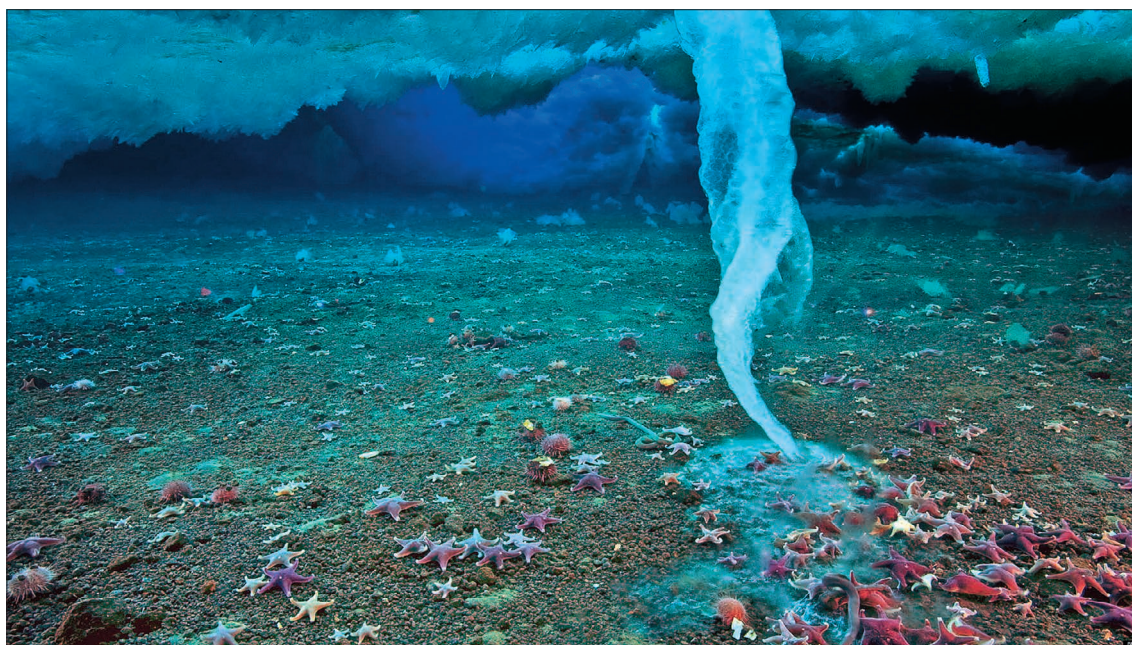


Рис. 5. Ледовый палец смерти, или ледяной смерч.

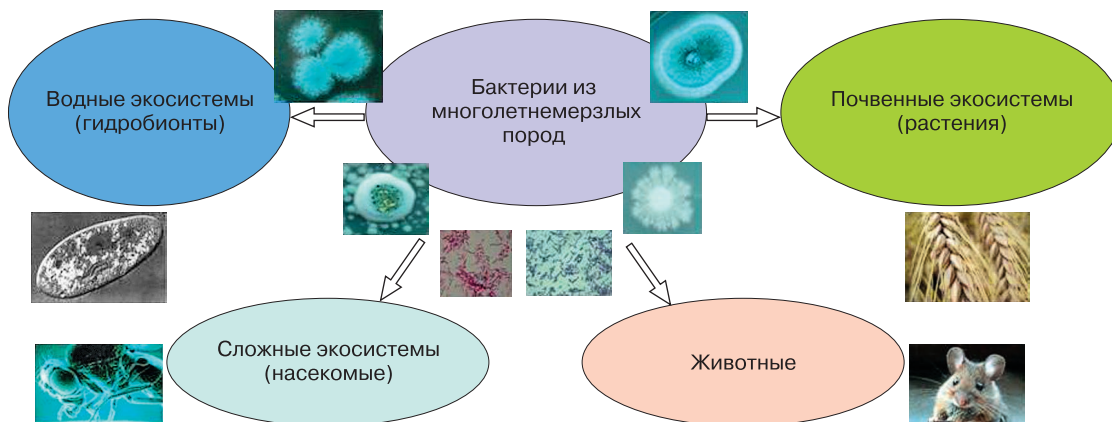


Рис. 6. Перспективы интродукции палеобиоты мерзлоты в современные экосистемы.

торию доледникового периода Антарктиды и изучение следов многомиллионной давности – может перевернуть многие наши представления о мире. Жаль, что первооткрыватели этого озера – члены корреспонденты РАН И.А. Зотиков и А.П. Капица – не дожили до конца эксперимента, прорыва человечества в познании тайн природы.

**Палеобактерии.** Криосфера является средой жизнеобеспечения и сферой деятельности многочисленных видов микроорганизмов, среди которых находятся такие, что сохраняют жизнеспособность сотни тысяч и миллионы лет. Их способность препятствовать разрушению генетического аппарата в геологическом масштабе времени уникальна и предполагает наличие особых, неизвестных пока механизмов защиты или репараций ДНК от тепловой деструкции, излучений, свободных радикалов и других повреждающих факторов.

Одна из таких бактерий *Bacillus F.*, которая защищена патентом [Штамм..., 2011], стала объектом совместных исследований с коллегами из почти двух десятков лабораторий России, Украины, Швеции, Австрии, Японии, Норвегии. Выде-

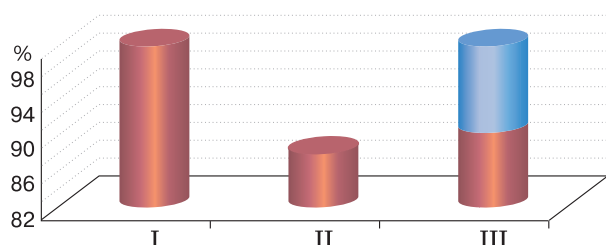


Рис. 7. Влияние низкомолекулярных веществ из продуктов метаболизма палеобактерий на жизнеспособность лимфоцитов человека *in vitro*.

I – исходный уровень лимфоцитов; II – инкубация лимфоцитов на холоде; III – инкубация лимфоцитов на холоде с добавлением вещества из метаболитов палеобактерий.

ленные новые виды бактерий крайне немногочисленны, находятся в мерзлых породах в виде единичных выживших клеток и относятся к психротолерантным непатогенным микроорганизмам [Брушков и др., 2009].

Изучение биологической активности палеобиоты в отношении различных представителей современных экосистем – растений (пшеница), гидробионтов (инфузории), насекомых (дрозофилы) и животных (лабораторные мыши) – позволило выделить отдельные штаммы микроорганизмов с явно выраженными свойствами адаптогенов, способных активировать адаптивный потенциал современных живых систем (рис. 6). Причем биопотенциал палеобиоты активируется в условиях пониженных температур и проявляется в дозах, в 100–1000 раз меньших, чем у их современных аналогов (рис. 7, 8).

В последнее десятилетие усилия мировой научной общественности направлены на развитие

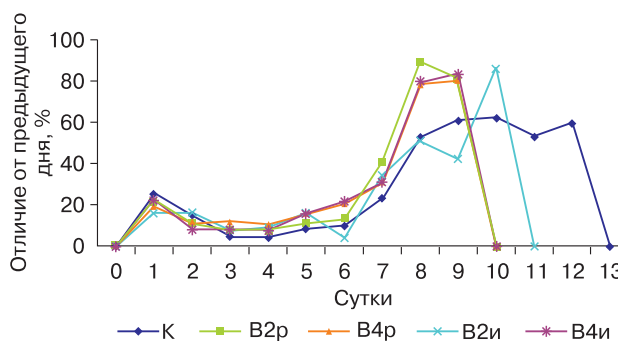


Рис. 8. Скорость регенерации кожной раны под влиянием низкомолекулярных веществ из продуктов метаболизма палеобактерий.

К – контроль; B2p, B4p – низкомолекулярные вещества 2 и 4 соответственно, нанесенные локально на рану; B2и, B4и – внутривентриальная инъекция низкомолекулярных веществ 2 и 4 соответственно.

нового научного направления – геомедицины, одной из задач которой является поиск средств адаптации человека к современным условиям, связанным с вариациями погоды и климата, загрязнением окружающей среды, длительными полетами и погружениями и т. д. Даже первые результаты опробования продуктов из палеобиоты на высших организмах говорят о перспективности этой области геомедицины [Каленова, Субботин, 2012].

В 30-е гг. XX столетия В.И. Вернадский уделял серьезное внимание первым находкам жизнеспособной биоты в мерзлоте П.Н. Каптерева. В его записях мы читаем, что эта проблема требует большого внимания и является одной из важнейших работ Комитета по вечной мерзлоте (см. [Рузова и др., 2012]). Далее: “основным является вопрос о геологической длительности, в какой латентная жизнь сохраняется в вечной мерзлоте” [Вернадский, 1938].

После периода забвения эта проблема нашла яркое отражение в исследованиях Д.А. Гиличинского. Его работы по палеобиоте, неизменно поддерживаемые академиком Г.А. Заварзиным, изыскания в Антарктиде и Субарктике, труды по астробиологии – достойный ответ на призыв Владимира Ивановича Вернадского.

### Литература

**Брушков А.В., Грива Г.И., Мельников В.П. и др.** Реликтовые микроорганизмы криолитозоны как возможные объекты геронтологии // Успехи геронтологии, 2009, т. 22(2), с. 253–258.

**Вернадский В.И.** Из записей в дневнике // Архив АН СССР, ф. 518, оп. 4, д. 67.1938.

**Истомин В.А.** Газовые гидраты в природных условиях / В.А. Истомин, В.С. Якушев. М., Недра, 1992, 236 с.

**Каленова Л.Ф., Субботин А.М.** Микроорганизмы криолитозоны – объекты поиска особых адаптивных механизмов и

международной экспедиции к древнейшей мерзлоте Евразии // ХолодОк, 2012, № 1 (9), с. 54–60.

**Киров М.В.** Новый подход к исследованию структуры и свойств льдоподобных систем // Криосфера Земли, 2011, т. XV, № 4, с. 41–43.

**Котляков В.М.** Природопользование и устойчивое развитие. Мировые экосистемы и проблемы России. М., Изд-во “КМК”, 2006, 448 с.

**Мельников В.П., Геннадик В.Б.** Криософия – система представлений о холодном мире // Криосфера Земли, 2011, т. XV, № 4, с. 3–8.

**Мельников В.П., Нестеров А.Н., Поденко Л.С. и др.** Метастабильные состояния газовых гидратов при давлениях ниже давления равновесия лед–гидрат–газ // Криосфера Земли, 2011, т. XV, № 4, с. 80–83.

**Моисеев Н.Н.** Комментарии к “эволюции атмосферы” В.А. Костицина // Эволюция атмосферы, биосферы и климата / В.А. Костицин. М., Наука, 1984, с. 40–94.

**Поденко Л.С., Молокитина Н.С., Шаламов В.В.** Новый класс дисперсий воды, устойчивых к замерзанию–оттаиванию // Криосфера Земли, 2011, т. XV, № 4, с. 58–60.

**Рузова О.В., Самсонова В.В., Доманский В.О.** Невидимки в криолитосфере // ХолодОк, 2012, № 1 (9), с. 61–73.

**Федорец А.А.** Капельный кластер // Письма в ЖЭТФ, 2004, т. 78, вып. 8, с. 457–459.

**Шавлов А.В., Джуманджи В.А., Романюк С.Н.** Пространственно упорядоченные структуры из капель воды в атмосферных облаках // Криосфера Земли, 2011а, т. XV, № 4, с. 52–54.

**Шавлов А.В., Писарев А.Д., Рябцева А.А.** Феномен интенсификации электрохимических процессов на контактах металлов со льдом // Криосфера Земли, 2011б, т. XV, № 4, с. 55–57.

**Штамм** бактерий *Bacillus* sp., обладающий иммуномодулирующей и геропротекторной активностью: пат. 2413760 Рос. Федерация / Брушков А.В., Грива Г.И., Карнаухов Н.Н., Мельников В.П., Репин В.Е., Суховой Ю.Г., Милованов В.И., Филин В.А.; заявка № 2009116228/10; заявл. 29.04.09; опубл. 10.11.10, Бюл. № 24.

**BBC Nature:** ‘Brinicle’ ice finger of death filmed in Antarctic, 2011. – <http://www.bbc.co.uk/nature/> (дата обращения: 10.06.2012).

Поступила в редакцию  
14 сентября 2012 г.