

**ПРОБЛЕМЫ КРИОЛОГИИ ЗЕМЛИ**

УДК 624.131.4:551

**ПРОБЛЕМЫ ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОКРИОЛОГИИ НА РУБЕЖЕ XXI ВЕКА**

**Л. Н. Хрусталеv**

*Московский государственный университет, геол. ф-т, 119899, Москва, Воробьевы горы, Россия*

В статье рассмотрен круг проблем, вставших перед инженерным мерзлотоведением в последние годы в связи с интенсивными антропогенными изменениями окружающей среды. Проанализированы результаты исследований, направленных на решение этих проблем. Обсуждены пути дальнейших научных разработок для ускорения технического прогресса в освоении северных территорий.

*Геотехническая система, надежность, строительная технология, мониторинг, экология, окружающая среда*

**PERMAFROST ENGINEERING PROBLEMS ON THE BOUNDARY OF XXI CENTURY**

**L. N. Khrustalev**

*Moscow State University, Department of Geology, 119899, Moscow, Vorobjovy Gory, Russia*

In the article we consider permafrost engineering problems, which result from intensive antropogenic changes of environment in the last years. The results of studies, directed to the decision of these problems were analyzed. And also the ways of further scientific research for acceleration of technological progress in development of northern territories are discussed.

*Geotechnical system, reliability, building technology, monitoring, ecology, environment*

**ВВЕДЕНИЕ**

Освоение огромных территорий со всем комплексом сопутствующих работ по созданию инфраструктуры оказывает негативное воздействие на исходные природные условия, в первую очередь на экологическую обстановку. На севере эти изменения особенно масштабны, поскольку здесь природные комплексы характеризуются относительно малой инерционностью, следствием чего являются не только ухудшение условий проживания человека, но и большие материальные потери, связанные с деформациями и разрушениями сооружений. Дальнейшее продвижение на север, а также поддержание уже имеющейся инфраструктуры невозможно без детального изучения закономерностей взаимодействия человека и природы в новых условиях и решения вытекающих из этого прикладных задач. Необходимость проведения таких исследований на рубеже XXI в. обусловлена:

— возросшей ролью сырьевых ресурсов в экономике страны, месторождения которых в

большой своей части находятся в криолитозоне и на шельфе арктических морей;

— опасным скоплением радиоактивных отходов, которые могут быть захоронены в вечномерзлых толщах;

— важностью северного морского пути как кратчайшей водной коммуникации между европейскими и азиатскими регионами государства, инфраструктура которого располагается на арктическом побережье в районах с высокольдистыми, засоленными вечномерзлыми грунтами.

Очертим круг проблем, вставших перед инженерной геокриологией в последние годы.

**ФОРМУЛИРОВКА ПРОБЛЕМ**

Функционирование современных горнодобывающих, перерабатывающих и промышленно-гражданских комплексов инженерных сооружений в криолитозоне вызывает изменение всех компонентов природной среды: климата, растительного покрова, мезо- и микрорельефа, ре-

жима поверхностных и грунтовых вод, температурного режима и конфигурации мерзлых толщ, что в свою очередь приводит к изменению свойств основания самих сооружений и сказывается на их устойчивости.

В зависимости от планировки застройки, ее плотности, конструкции сооружений и их назначения, а также климатических и геологических условий района строительства в одних случаях на застроенной территории происходит деградация вечномерзлых толщ, в других — их развитие. Эти процессы протекают весьма интенсивно и становятся практически ощутимыми еще до окончания срока службы сооружений. По этой причине формирование локальных температурных полей под конкретными инженерными сооружениями, расположенными в черте застройки, во многом определяется направленностью теплового процесса в грунтах под застройкой в целом. Данное обстоятельство до настоящего времени в расчетах не учитывалось, что являлось одной из причин деформаций сооружений. Необходимо отметить, что наибольший процент деформирующихся сооружений (до 60 %) наблюдается в местах расположения крупных гражданских и промышленных агломераций, где происходит значительное тепловое загрязнение геологической среды.

Из вышесказанного вытекают две проблемы, которые могут быть сформулированы следующим образом.

1. Изучение закономерностей теплового взаимодействия комплекса инженерных сооружений с вечномерзлыми грунтами и возможностей его направленного регулирования.

2. Разработка научных основ создания экологически чистых технологий промышленного и гражданского освоения территорий с вечномерзлыми грунтами.

Следует подчеркнуть, что первая проблема не является новой, она была сформулирована еще в 1958 г. чл.-кор. АН СССР П. Ф. Швецовым, однако до настоящего времени должного развития не получила. Исследования по ней свелись лишь к сбору информации по изменению компонентов природной среды, поэтому разработка проблемы и сегодня продолжает оставаться актуальной.

В последние годы пристальное внимание научной и инженерной общественности привлекают вопросы ожидаемого глобального потепления климата, которое связывают с повышением содержания в атмосфере Земли парниковых газов. Особый интерес эти вопросы вызывают у геокриологов, поскольку потепление климата может привести к потере несущей способности вечномерзлых оснований и деформации сооружений. Сегодня существует больше десятка различных

сценариев потепления, каждый из которых имеет свои особенности.

В связи с этим перед мерзлотоведами встают третья и четвертая проблемы.

3. Разработка научных основ выбора сценария потепления в зависимости от ответственности сооружений и поиск оптимальных способов обеспечения их устойчивости при выбранном сценарии.

4. Поиск оптимальных способов поддержания эксплуатационной пригодности созданной инфраструктуры в условиях глобального потепления климата.

Решение 3-й проблемы с позиций существующего детерминистского подхода к расчету теплового и механического взаимодействия сооружений с геологической средой не представляется возможным в силу присущих этому подходу двух существенных недостатков: во-первых, он не учитывает вероятностный характер перерабатываемой информации, например, сценария потепления, и получаемых результатов; во-вторых, он количественно не оценивает надежность работы геотехнической системы, поэтому экономическое сравнение вариантов проектных решений теряет смысл, ибо варианты, различающиеся по продолжительности безотказной (надежной) работы не могут быть сопоставимы по стоимости. В связи с этим решение названной проблемы может быть получено только с позиций вероятностного подхода, а именно с позиций теории надежности. Поэтому пятой проблемой инженерной геокриологии является:

5. Разработка теории надежности геотехнических систем в криолитозоне.

Решение 4-й проблемы лежит на пути поиска эффективных источников энергии. Одним из них является сама суровость климата Севера. Наличие ощутимой разницы между среднегодовой температурой наружного воздуха и среднегодовой температурой вечномерзлого грунта позволяет довольно продолжительное время после начала потепления поддерживать заданный температурный режим в основании сооружений. Проблема заключается в том, чтобы найти наиболее эффективный способ подачи естественного холода в грунт с тем, чтобы довести до минимума разность среднегодовых температур наружного воздуха и грунта основания. Другим источником является преобразование низкопотенциальной энергии, отбираемой из грунта в основании зданий, в высокопотенциальную для отопления помещений. Это преобразование возможно с помощью разработанных в последние годы тепловых насосов, которые могут поддерживать заданный температурный режим в основании застройки независимо от изменения температуры наружного воздуха.

Вышеперечисленное позволяет сформулировать шестую проблему.

6. Поиск эффективных способов поддержания заданного температурного режима грунта в основании застроенной территории.

В последние годы в связи с выработкой ресурсов морских судов с атомными энергетическими установками, накоплением отходов производства атомных электростанций и уничтожением ядерных боеприпасов со всей остротой встал вопрос захоронения радиоактивных отходов. При этом места захоронения должны отвечать трем основным условиям: обладать надежными естественными противорадиационными барьерами, располагаться в ненаселенной местности и быть доступными для безопасной транспортировки отходов. Этим условиям в значительной степени отвечают территории сплошного распространения вечномерзлых толщ большой мощности. Поэтому седьмая проблема инженерной геокриологии может быть сформулирована следующим образом.

7. Разработка научного обоснования использования вечномерзлых толщ для захоронения радиоактивных отходов.

Строительство на шельфе арктических морей сооружений газо- и нефтепромыслов связано с большими трудностями, которые обусловлены подвижками ледяных полей. Давление льда на сооружения во время подвижек во много раз превосходит волновые воздействия и часто является причиной разрушения конструкций. В практике известны случаи, когда давление льда приводило к опрокидыванию буровых платформ и человеческим жертвам. В этом отношении искусственные острова являются более безопасными сооружениями, чем стальные и железобетонные платформы. Однако по своим экономическим показателям они уступают последним. Положение может быть исправлено, если в качестве строительного материала островов использовать искусственный или естественный лед. Проведенные нами предварительные исследования свидетельствуют о реальности высказанной идеи. Отсюда формулируется восьмая проблема инженерной геокриологии.

8. Изучение возможности использования искусственного и естественного льда в качестве материала для создания ледовых и ледогрунтовых островов на шельфе арктических морей и разработка предложений по их конструированию и расчету.

Вечномерзлые грунты как основания инженерных сооружений обладают большой инерционностью. Поэтому под воздействием тепловых и механических нагрузок происходит постепенное изменение их свойств. Это дает возможность заблаговременно выявлять опасные не-

гативные изменения и принимать необходимые превентивные меры. Для реализации этой возможности должен осуществляться мониторинг геотехнической системы (наблюдения, прогноз, управление). Сегодня мониторинг геотехнических систем находится в стадии становления и включает, как правило, лишь наблюдения. Поэтому диагностика устойчивости сооружений производится только на момент наблюдений, когда принимать защитные меры оказывается или слишком поздно, или неоправданно дорого. В связи с этим первой задачей исследований является разработка методики экстраполяции данных наблюдений во времени и проведение прогнозной диагностики для принятия управляющих решений. Последние должны быть направлены на заблаговременное регулирование теплового и механического взаимодействия сооружения с грунтом. С помощью регулирования можно восстанавливать вырабатываемую надежность геотехнической системы и продлевать срок ее службы. Это станет особенно важным, если начнется потепление климата. Однако регулирование возможно лишь на управляемых системах. Поэтому второй задачей является разработка предложений по созданию таких систем.

Вышеизложенное позволяет сформулировать девятую проблему инженерной геокриологии.

9. Разработка научных подходов к созданию управляемых геотехнических систем и геокриологических прогнозов, основанных на экстраполяции во времени данных натурных наблюдений.

Перечисленные девять проблем, по нашему мнению, сегодня определяют развитие инженерной геокриологии и имеют важное прикладное значение. Остановимся на возможных путях решения некоторых из них.

#### УПРАВЛЕНИЕ ГЕОФИЗИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ НА ЗАСТРОЕННОЙ ТЕРРИТОРИИ

Геофизические процессы, протекающие в основании застроенной территории, определяются экстенсивными и интенсивными факторами воздействия [Швецов и др., 1973]. К экстенсивным относятся площади контактов теплоисточников или стоков тепла с геологической средой; к интенсивным — температура контакта или величина теплоток. Математическая модель такой природно-технической системы есть полупространство с внутренними процессами кондуктивной и конвективной теплопередачи с фазовыми превращениями влаги, к поверхности которого приложена разная по знаку и величине тепловая нагрузка, выражаемая через температуру поверхности.

Если в грунтовой толще конвективная составляющая передачи тепла пренебрежимо мала и температурное поле определяется только кондуктивным теплопереносом, то легко показать [Хрусталеv, 1971], что влияние отдельных тепловых воздействий исчезает уже на глубинах порядка 20—30 м, и динамика геофизического процесса целиком определяется средневзвешенной по площади или среднеинтегральной температурой поверхности, к которой стремится конечное (стационарное) температурное поле.

Таким образом начальное состояние системы характеризует ее температура у подошвы слоя с годовыми теплооборотами ( $T_0$ ) конечное — среднеинтегральная температура поверхности застроенной территории ( $T_{cp}$ ). Соотношение между ними определяет направленность мерзлотного процесса на застроенной территории. Условие  $T_{cp} = T_0$  соответствует равновесие системы;  $T_{cp} < T_0$  — развитие мерзлых толщ;  $T_{cp} > T_0$  — деградация мерзлых толщ. Интенсивность мерзлотных процессов определяется решением линейной задачи Стефана, к которой сводится после некоторых упрощений задача формирования температурного поля в основании застроенной территории. Из этого следует, что воздействуя на среднеинтегральную температуру, можно управлять направленностью и интенсивностью геофизических процессов в основании застроенной территории.

Сегодня ни у кого не вызывает сомнения, что нарушение природных условий, которое в большинстве случаев имеет необратимый характер, сопряжено со значительными потерями материальных средств и труда. Поэтому при освоении территории следует стремиться к минимуму нарушений. Применительно к рассматриваемой задаче это должно означать, что  $T_{cp}$  равно  $T_0$ . Однако достичь выполнения указанного условия не представляется возможным хотя бы потому, что сама среднеинтегральная температура является случайной величиной и определяется совокупностью действия многих случайных факторов. Ее отклонения от своего номинала при условии  $T_{cp} = T_0$  могут привести как к деградации, так и к развитию мерзлых толщ. Поскольку процесс деградации наиболее опасен, то разумно при формировании структуры застройки стремиться к более низким значениям среднеинтегральной температуры, чем  $T_0$ , по крайней мере на величину ее возможных отклонений. Возможности для достижения этой цели заключаются, во-первых, в регулировании баланса элементов застраиваемой территории и, во-вторых, в регулировании температуры поверхности в пределах каждого элемента.

Задача изменения баланса элементов застраиваемой территории решается изменением

плотности застройки, разумеется, в пределах градостроительных требований и экономической целесообразности. В силу этого возможности такого регулирования ограничены функциональным назначением застройки.

Большие перспективы открываются при регулировании температуры поверхности грунта в пределах каждого элемента застраиваемой территории. На территории, занимаемой зданиями, это производится путем назначения определенного принципа строительства, за счет чего можно изменить температуру поверхности грунта на несколько градусов. Однако выбор принципа строительства не может производиться произвольно, поскольку зависит не только от общей целесообразности регулирования теплового режима грунтов в пределах застраиваемой территории, но и от частных факторов (мерзлотно-геологические условия конкретной стройплощадки, назначение сооружения, принцип строительства соседних сооружений и т. д.), которые могут преваляровать. В этом заключается ограниченность подобного регулирования.

В пределах территорий, расположенных вне контура зданий, изменение температуры производится за счет активной подготовки поверхности и регулирования снежных отложений на ней, а также за счет устройства охлаждающих подсыпок, о которых мы скажем ниже.

Таким образом, арсенал технических средств и способов воздействия на формирование среднеинтегральной температуры достаточно велик, хотя и не беспредель. Выявить пути его оптимального использования — предмет дальнейших исследований.

## СОЗДАНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Тепловое загрязнение геологической среды и связанная с ним деградация мерзлых толщ в основном обусловлены тепловыделениями в грунт сооружений, возводимых по второму принципу строительства. Однако эти тепловыделения могут быть сведены до нуля за счет применения нового способа строительства — стабилизацией вечномерзлых грунтов в основании сооружений [Хрусталеv, Никифоров, 1990]. В настоящее время способ стабилизации разработан пока только для зданий, расположенных на участках с вечномерзлыми грунтами несливающегося типа. В основу технического решения положено известное в физике явление — постоянство температуры при фазовых переходах вещества, к числу которых относится процесс промерзания—оттаивания грунтовой влаги. Верхняя граница вечномерзлых грунтов является границей фазового перехода грунтовой влаги. Если выше

этой границы искусственно создать и постоянно поддерживать под зданием вторую фазовую границу, то между двумя границами расположится слой грунта с постоянной температурой и, соответственно, нулевым температурным градиентом. Отсутствие градиента означает отсутствие теплопотока, поэтому безградиентный слой является абсолютной теплоизоляцией, обеспечивающей полную защиту вечномерзлых грунтов от теплового влияния здания и стабилизацию их верхней поверхности на первоначальном уровне.

Конструктивно идея создания абсолютной теплоизоляции реализуется следующим образом. Под зданием устраивается вентилируемое подполье, режим вентиляции которого назначается из условия равенства глубины сезонного промерзания грунта в подполье глубине сезонного оттаивания грунта. В этом случае сезонное промерзание—оттаивание происходит непрерывно в течение всего года, а, следовательно, под зданием постоянно присутствует граница сезонного промерзания—оттаивания. Между этой границей и верхней поверхностью вечномерзлого грунта располагается безградиентный слой талого грунта, который и является абсолютной теплоизоляцией. Подошва фундамента здания закладывается в этом слое на глубине, устанавливаемой расчетом.

С 1975 по 1994 гг. в Воркутинском промышленном районе по новой технологии построено три жилых микрорайона (66 пятиэтажных зданий) общей полезной площадью 169,5 тыс. м<sup>2</sup>. При этом резко повышены планировочные, технические и экономические показатели застройки. В 1,6 раза увеличена плотность жилого фонда, в 4,6 раза снижена протяженность подземных сетей, в 1,43 раза уменьшена стоимость 1 м<sup>2</sup> полезной площади и в 40 раз сокращены затраты электроэнергии.

На основе описанного выше физического явления, очевидно, могут быть разработаны и другие способы строительства, предотвращающие тепловое загрязнение геологической среды. Работа в этом направлении есть одна из главных задач будущих исследований.

### ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ГЕОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Вероятностный подход к расчету геотехнических систем состоит в следующем [Хрусталев, Пустовойт, 1988]. Тепловое и механическое взаимодействие сооружения с геологической средой трактуется как развивающийся во времени многомерный случайный процесс. Число измерений процесса определяется числом его выходных параметров; в простейшем случае ими являются несущая способность основания и сов-

местная деформация основания и сооружения. Если выходные параметры процесса не пересекают свои предельные значения, например, значения нагрузки, передаваемой на основание, и предельно допустимой деформации, то считается, что качество системы сохраняется; в противном случае оно утрачивается, происходит отказ системы. Вероятность сохранения качества в течение периода эксплуатации называется надежностью системы, а вся последовательность этой вероятности во времени — функцией надежности.

Вычисление функции надежности далеко не тривиальная задача. Возможны два пути ее решения — аналитический и численный. На сегодняшний день в инженерной геокриологии развит практически только численный метод или метод Монте-Карло. Все расчеты ведутся на ЭВМ. Нами разработаны программы, реализующие метод Монте-Карло для трех геотехнических систем: здание—основание, трубопровод—грунт, взлетно-посадочная полоса—основание. Расчеты по этим программам показывают, что функция надежности в основном определяется климатическими и техногенными факторами. При этом на некоторые техногенные факторы (назовем их управляющими параметрами) можно направленно воздействовать и тем самым изменять функцию надежности. Например, управляющими параметрами являются: глубина заложения свайного фундамента, толщина стенки трубопровода, мощность рабочего слоя дорожной насыпи и т. п. Определенным сочетанием управляющих параметров можно обеспечить любую наперед заданную надежность. В связи с этим возникает вопрос — а какой она должна быть?

Как известно, все созданные человеком системы имеют надежность меньше единицы. В результате этого неизбежны отказы и появление материального ущерба. Чем выше надежность, тем меньше ущерб. С другой стороны, высокая надежность требует больших материальных затрат на создание системы. Очевидно, надо найти компромиссное решение (оптимальное). Оно соответствует минимуму суммарных затрат, состоящих из затрат на создание системы (начальная стоимость) и затрат, связанных с возможным выходом ее из строя до окончания срока эксплуатации (цены риска), которые определяются функцией надежности. Оптимизация осуществляется варьированием управляющих параметров. На окончательный результат существенное влияние оказывают климатические параметры. Программы позволяют принимать их по заранее заданному закону и тем самым учитывать различные сценарии глобального потепления климата. Проведенные расчеты показывают, что с увеличением интенсивности потепления возрас-

тают оптимальные суммарные затраты и увеличивается оптимальная надежность геотехнической системы.

Если каждому сценарию потепления будет соотнесена вероятность его реализации, то можно сформулировать оптимизационную задачу, из решения которой получить ответ на актуальный вопрос — надо ли учитывать глобальное потепление климата при проектировании геотехнических систем в криолитозоне? Ответ будет положительным в том случае, если удорожание начальной стоимости геотехнической системы за счет учета фактора потепления будет меньше ущерба от потепления, умноженного на вероятность реализации сценария потепления. Математическая формулировка задачи и пример ее решения приведены в работе [Хрусталеv, 1997].

Вероятностный подход открывает широкие перспективы для развития геотехники в криолитозоне. Он позволяет на научной основе осуществлять выбор принципа использования вечномерзлых грунтов в качестве оснований, планировочного решения застройки и способа фундаментостроения, оценивать необходимость применения управляемых и резервных систем. При этом перечисленные задачи могут решаться с учетом глобального потепления климата. Используя вероятностный подход можно получить ответы на многие вопросы и в области инженерных изысканий. В частности, как зависит необходимое количество стадий изысканий от изменчивости геокриологических условий в районе строительства и стоимости проектируемого комплекса сооружений, какой оптимальный объем изысканий должен соответствовать каждой стадии и, наконец, каково место дорогостоящих методов опробования в общем составе работ. Перечисленные задачи дают основание считать вероятностный подход эффективным средством ускорения технического прогресса в строительстве на вечномерзлых грунтах.

### ЭФФЕКТИВНЫЕ СПОСОБЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ГРУНТОВ

К весьма эффективным и перспективным охлаждающим устройствам, поддерживающим основание тепловыделяющих сооружений в мерзлом состоянии, относятся системы из трубчатых горизонтальных установок, укладываемых в подсыпку из непучинистого материала на глубине, превышающей глубину сезонного оттаивания (охлаждающая подсыпка). Эффективность таких систем заключается в том, что охлаждение грунта начинается с первых же дней зимы, а не после промерзания сезонного слоя, как при поверхностном охлаждении вентилируемыми подпольями. В качестве охлаждающих устройств приме-

няются термосифоны, трубы или каналы с принудительной вентиляцией. В последние годы институтом „Гипротюменнефтегаз“ разработана принципиально новая конструкция горизонтального парожидкостного термосифона [Долгих, 1992]. Его принципиальное отличие от известного заключается в напорном и прямоточном (пар и жидкость движутся в одном направлении) движении теплоносителя. Это позволяет довести длину подземного теплообменника термосифона до 800 м (известные безнапорные противоточные термосифоны имеют длину подземного теплообменника до 25—30 м), перекрывать значительные пролеты и укладывать его не только под зданиями, но и на прилегающей территории, обеспечивая глубокое охлаждение грунтов основания. В этом случае температура грунта может быть доведена до температуры наружного воздуха. При повышении же среднегодовой температуры наружного воздуха, обусловленной глобальным потеплением климата, термосифоны можно объединить с тепловыми насосами, которые с помощью термосифонов будут отбирать низкопотенциальное тепло из грунта в основании застроенной территории и превращать его в высокопотенциальное тепло, которое пойдет на отопление зданий. Наши расчеты показали [Perlshtein et al., 1994], что в случае повышения температуры наружного воздуха по некоторому среднему сценарию климатического потепления противостоять деградации мерзлых толщ в черте застройки можно, если с помощью тепловых насосов отапливать в г. Воркута 0,16 % всех зданий, в г. Якутск — 0,5 % и в пос. Тикси — 1 %. Однако для этого необходимо иметь охлаждающую подсыпку под всей застроенной территорией. Целесообразность такого мероприятия определяется технико-экономическим расчетом.

### МОГИЛЬНИКИ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

Считается, что наилучшим видом изоляции радиоактивных отходов (РАО) на сегодняшний день является подземная изоляция. При этом используется многобарьерная система защиты, включающая естественные (геологические) и инженерные барьеры. Основным видом защиты является естественный барьер, в качестве которого рассматриваются кристаллические породы, каменная соль и глины.

В последнее время большое внимание уделяется вечномерзлым породам как среде для размещения могильников РАО. Анализ показывает высокую перспективность этих пород для использования по указанному назначению. Это обусловлено их нижеследующими свойствами: мерзлые породы являются практически нефилт-

рующими, обладают высокой прочностью, имеют температуру ниже 0 °С, при которой замедляются окислительные процессы, что в свою очередь увеличивает сроки службы инженерных барьеров. Перечисленные достоинства мерзлых пород позволяют надежно обеспечить экологическую безопасность подземной изоляции нетепловыделяющих РАО в течение всего срока их потенциальной опасности.

При подземной изоляции тепловыделяющих РАО возникают некоторые проблемы, связанные с начальным оттаиванием породы вокруг могильника и последующим ее промерзанием после падения активности источника. Концепция обеспечения экологической безопасности в этом случае была сформулирована в работе [Лопатин, Казаков, 1996]: „Необходимым и достаточным условием практического исключения выноса радионуклидов за пределы могильника в течение всего срока потенциальной опасности изолируемых РАО является превышение времени работоспособности инженерных барьеров над временем естественного восстановления криогенного водопора, нарушенного в процессе тепловыделения РАО“. В связи с этим возникает целый ряд задач, которые должны быть решены в ближайшее время. В работе [Ершов и др., 1997] перечислены некоторые из них, а именно:

- оценка теплового взаимодействия РАО с вмещающими мерзлыми породами с целью недопущения существенного изменения механических и изоляционных свойств окружающего массива горных пород в целом;

- оценка изоляционных (фильтрационных, ионно-миграционных, газопроницаемых, сорбционных, коррозионных и др.) свойств мерзлых пород и прогноз их физико-химического взаимодействия с РАО с целью сохранения и обеспечения надежного геохимического барьера на весь требуемый период их изоляции от экосферы;

- оценка механической устойчивости грунтовых стенок могильника в мерзлых породах на период его строительства и последующей эксплуатации.

Необходимо отметить, что период эксплуатации могильников превосходит все известные сроки эксплуатации инженерных сооружений на несколько порядков, так, например, американские нормативы предусматривают необходимость обеспечения надежной изоляции высокоактивных отходов на срок 10 000 лет. Очевидно, что при таких сроках совершенно необходимы долгосрочные прогнозы состояния мерзлотно-геологических условий в районе могильника. Задача особенно актуальна в связи с возможным глобальным потеплением климата. Предварительные расчеты, проведенные на кафедре геокриологии МГУ [Ершов и др., 1997],

позволили очертить районы возможного захоронения РАО в мерзлых породах. Могильники рекомендуется располагать на глубинах не менее 50 м от поверхности земли и по возможности в глинистых породах. В настоящее время институтом „ВНИПИП протехнология“ начаты проектные проработки могильника РАО на архипелаге Новая Земля.

## АЙСБЕРГ — БУРОВАЯ ПЛАТФОРМА

Главная сложность освоения шельфа арктических морей связана с их ледовитостью, а именно с ледовыми нагрузками на сооружения, которые по своей величине превосходят волновые при ураганных ветрах. В этом отношении искусственные острова для размещения оборудования нефтяного или газового промысла являются более безопасными сооружениями, чем стальные и железобетонные платформы. Однако искусственные острова выдерживают конкуренцию с платформами только при глубинах моря до 15—20 м. При больших глубинах материалоемкость островов настолько возрастает, что всякое экономическое сравнение теряет смысл и платформы становятся безальтернативными сооружениями.

В 1982 г. С. Э. Городецкий высказал фантастическую на первый взгляд идею — использовать посаженные на дно айсберги для размещения бурового оборудования. Участвуя в работе 15-й антарктической экспедиции, он обратил внимание на несколько айсбергов вблизи южнополярной станции Молодежная, которые были посажены на мель морским течением и существовали более 7 лет.

Айсберги хорошо противостояли внешним воздействиям. Это происходило, во-первых, потому, что пресный лед айсбергов был значительно прочнее морского льда, который разрушался при напозании на них, во-вторых, айсберги, обладая колоссальной массой, хорошо противостояли сдвигающим нагрузкам при ледовых подвижках и, наконец, в-третьих, они имели большой запас холода, что значительно снижало интенсивность их таяния в короткое антарктическое лето. Так измерения, проведенные в Антарктиде на базе Дружная-1, показали, что температура в толще айсберга, образовавшегося из шельфового ледника Фильхнера, достигает -30 °С.

Реализация идеи предлагается следующим образом [Городецкий, Хрусталева, 1991]. Под выбранный в акватории моря участок подбирают айсберг таких размеров, чтобы его осадка была несколько меньше, чем глубина моря в месте установки. Ледовую гору буксируют к месту установки и затем нагружают балластом, чтобы посадить ее на дно и обеспечить требуемую устойчивость. В качестве балласта может исполь-

зоваться лед, создаваемый послойным намораживанием морской воды на поверхность, либо грунт со дна моря. Посадка айсберга на дно может быть достигнута и за счет изменения его плавучести — с помощью направленного взрыва часть периферийного объема льда откалывается, и айсберг оседает. После установки на айсберге возводят буровую вышку, сооружения промысла и причал для судов.

Главным преимуществом айсберга как опоры под сооружения газо- и нефтепромыслов является его абсолютная безопасность, а также возможность осваивать акватории с глубинами моря до 200 м и более, где применение известных платформ становится проблематичным.

Предлагаемая идея может быть реализована, очевидно, только в том случае, если известно как отыскать айсберг нужных размеров и формы, и как его доставить к месту установки. Эти два вопроса в настоящее время проработаны достаточно полно в связи с проектами использования айсбергов для целей водоснабжения безводных территорий.

На Земле имеются три района образования айсбергов: Гренландия, острова арктического архипелага и Антарктида, которые ежегодно продуцируют несколько десятков тысяч экземпляров различных размеров и формы. Для освоения Российской Арктики могут быть использованы айсберги, образованные ледниками о. Шпицберген, Земли Франца-Иосифа, Новой и Северной Земли и Гренландии. Поиск айсбергов и их обмеры производятся с самолетов с использованием данных космической фотосъемки.

Транспортировка айсберга к месту установки сегодня тоже не является проблемой. В 1970 г. в Канаде был проведен первый успешный эксперимент по транспортировке айсбергов массой от 99,7 до 277 тыс. т. Транспортировка осуществлялась грузовым кораблем со скоростью одна миля в час. Измерения показали, что тяговые усилия корабля с учетом совместного действия течений, ветра и кориолисовых сил не превышают 13 т. Следует отметить, что обычный морской буксир обеспечивает тяговое усилие 28—30 т.

Таким образом, приведенные сведения свидетельствуют о технической возможности реализации изложенной идеи. Однако для ее практического воплощения нужны серьезные теоретические проработки, экспериментальные исследования и модельные испытания. От результатов этой работы во многом будет зависеть успех освоения шельфа арктических морей.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Очерченный в статье круг проблем, разумеется, не может считаться исчерпывающим. Однако, по нашему мнению, сегодня он определяет стратегию хозяйственного освоения криолитозоны, в основу которой кладутся требования обеспечения высокой надежности инфраструктуры при минимальном загрязнении геологической среды и экономном расходовании энергетических и материальных ресурсов. Решение этих проблем в значительной мере осложняется необходимостью учета возможного глобального потепления климата, с которым инженеры вынуждены будут считаться при создании гражданских и промышленных комплексов XXI в. Первая попытка решения некоторых из них показала плодотворность изложенных в статье нетрадиционных подходов, которые в будущем, мы надеемся, найдут дальнейшее развитие.

Статья написана по результатам работ, выполняемых при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 98-05-64433).

## Литература

- Городецкий С. Э., Хрусталева Л. Н. Айсберг — буровая платформа // Наука в СССР, 1991, № 3, с. 96—99.
- Долгих Г. М. Система температурной стабилизации грунтов // Наука в СССР, 1992, № 2, с. 118—119.
- Ершов Э. Д., Пармузин С. Ю., Лисицына О. М. Многолетнемерзлые породы как среда захоронения экологически опасных отходов // Геоэкология, 1997, № 1, с. 23—39.
- Лопатин В. В., Казаков А. Н. Подземная изоляция радиоактивных отходов в многолетнемерзлых горных породах // Мат-лы первой конф. геокриологов России. М., 1996, кн. 4, с. 104—112.
- Хрусталева Л. Н. Температурный режим вечномерзлых грунтов на застроенной территории. М., Наука, 1971, 168 с.
- Хрусталева Л. Н., Пустовойт Г. П. Вероятностно-статистические расчеты оснований зданий в криолитозоне. Новосибирск, Наука, 1988, 253 с.
- Хрусталева Л. Н., Никифоров В. В. Стабилизация вечномерзлых грунтов в основании зданий. Новосибирск, Наука, 1990, 236 с.
- Хрусталева Л. Н. Приложение теории надежности к задачам инженерной геокриологии // Криосфера Земли, 1997, т. 1, № 2, с. 12—17.
- Швецов П. Ф. и др. Основы методики инженерно-геокриологических прогнозов при разведке месторождений твердых ископаемых. М., Недра, 1973, 156 с.
- Perlshtein G. Z., Vlasov V. P., Khrustaleva L. N. The use of heat pumps in permafrost areas // Proceed. 2nd Int. Conf. on Arctic Margins. Magadan, September, 1993, p. 101—110.

Поступила в редакцию  
2 марта 1999 г.