

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ КРИОЛОГИИ ЗЕМЛИ

УДК 556:504; 574

ГЕОЭКОЛОГИЯ И ПРИНЦИПЫ ЭВОЛЮЦИИ ГЕОСИСТЕМ АРКТИКИ

В.И. Соломатин

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, географический ф-т,
119992, Москва, Воробьевы горы, Россия, vi.solomatin@mail.ru*

Рассматриваются основные проблемы геоэкологии Арктики. Дана географическая схема индустриализации ее территории. Обоснована фундаментальная роль динамического равновесия в триаде лед–вода–температура в долго- и краткосрочной эволюции природной среды Арктики. Анализируется ключевое значение льда как минерала и горной породы в природе устойчивости и динамики геосистем криолитозоны. Рассмотрены принципы паритета экономических и экологических законов природопользования в Арктике, а также технология методов стабилизации геосистем при индустриальном освоении ресурсов и территории криолитозоны.

Геоэкология Арктики, подземные льды, устойчивость и эволюция геосистем, экология природопользования

GEOECOLOGY AND PRINCIPLES OF THE EVOLUTION OF ARCTIC GEOSYSTEMS

V.I. Solomatin

*Lomonosov Moscow State University, Department of Geography,
119992, Moscow, Vorobyovy Gory, Russia, vi.solomatin@mail.ru*

The basic problems of geoecology of the Arctic regions are considered in the article. The geographical circuit of industrialization of the Arctic territory is given. The fundamental role of dynamic balance in a triad “ice–water–temperature” in the long- and short-term evolution of the Arctic region’s environment is shown. The influence of ice, as of mineral and rock, on the nature of stability and changes of permafrost geosystem is analyzed. Principles of parity of economic and ecological laws of wildlife management in the Arctic region and technological methods of geosystem stabilization in the industrial development of resources and territory of cryolithozone are analysed.

Geoecology of the Arctic, underground ice, stability and evolution of environment, nature exploitation and ecology

ВВЕДЕНИЕ

Значительная часть территории и морского пространства России располагается в северной приполярной области Земли, которую называют Арктикой. До последнего времени понятие Арктика ассоциировалось с представлениями о крае за пределами обжитого мира цивилизации, о труднодоступности и запредельной суровости климата, об угнетенной природе и дискомфорте, в условиях которого человек оказывается за гранью выживания. Но вот настала пора, когда ледяная страна становится ареной бурной деятельности человека, вооруженного всей мощью технического прогресса. Теперь уже осваиваемая природа оказывается в кризисной ситуации. И, как снежный ком, начинают нарастать экологические проблемы. Сверхсуровая в рамках естественных законов пространствен-

но-временной эволюции природа Арктики оказывается одновременно сверхчувствительной к внешним воздействиям. Человек находит пути благоустроиться здесь и даже строит крупные города. А все возрастающий техногенный пресс, напротив, угрожает естественному природному балансу “Белой пустыни”. Но и техника не выдерживает лютой стужи, бездорожья, выходит из строя из-за техногенной активизации негативных термоденудационных процессов. Уже нет победителей: и экология, и техника, и экономика терпят обоюдный урон. Эти проблемы потребовали немедленного решения, когда темпы и масштабы негативного антропогенного воздействия на природу Арктики стали угрожающими и когда выяснилось значение околополюсного пространства для кли-

матического благополучия всей планеты, недопустимость разбалансировки его природной среды.

Предмет предлагаемой работы – геоэкологический анализ территории Арктики, т. е. анализ естественных особенностей околополюсного пространства, географии индустриального освоения Российской Арктики и техногенных воздействий на природно-территориальные комплексы, поиск научных принципов экологической рационализации природопользования в криолитозоне. В работе подчеркивается фундаментальная роль льда в пространственно-временной эволюции природной среды Арктики, в ее реакции на глобальные и короткопериодные изменения климата, а также значение льда и его фазовых превращений для стабильности и повышенной уязвимости геосистем криолитозоны.

ПОНЯТИЕ АРКТИКА. ГЕОГРАФИЯ И ИСТОРИЯ ОСВОЕНИЯ

Более половины территории России относится к зоне многолетнемерзлых пород. Ее северную часть, область сплошного распространения мерзлоты, иногда предлагают относить к материковой части Арктики [Arctic..., 1974]. Примерно в этих же границах располагается область так называемого Крайнего Севера вместе с районами, приравненными к нему в силу сходства природных условий. Кроме материковой части Арктика включает и акваторию Арктического бассейна, его шельф, ресурсы которых уже начали осваиваться, поэтому бассейн также должен входить в сферу экологического анализа. Особая часть Арктики – береговая зона арктических морей. Это наиболее динамичный контакт арктической акватории и суши. На некоторых участках термоабразия (гидродинамическое и тепловое воздействие моря и атмосферного тепла на берег) способна размыть и переместить береговую линию на несколько метров (до 10 м в исключительных случаях) за короткий безледный период арктического лета.

Арктический сектор России является наиболее экономически освоенным и населенным по сравнению с аналогичными зарубежными территориями. В то же время есть поучительные примеры успешного обустройства ряда зарубежных арктических территорий [Агранат, 1973]. В материковой Арктике России возведены самые крупные города и созданы самые мощные индустриальные комплексы, прежде всего сырьевой и горнодобывающей промышленности. Здесь разведаны и широко эксплуатируются колоссальные запасы углеводородного сырья, уникальные месторождения драгоценных, редких и цветных металлов, алмазов и многих других полезных ископаемых. Моря Арктического бассейна обладают богатыми биоресурсами. Наконец, Арктика – важные морские ворота

России, а вдоль арктического побережья пролегает стратегически важный для России Северный морской путь (СМП). Уже при нынешнем уровне освоенности ресурсов Арктики здесь производится продукция, обеспечивающая 11 % национального дохода России и 22 % ее экспорта. В недрах Арктики добывается 80 % российского газа, более 90 % никеля и кобальта, 60 % меди, 96 % платиноидов, 100 % барита. Рыбная промышленность России получает в Арктике до 15 % от общих объемов своей продукции.

Но потенциальные возможности сырьевых ресурсов Арктики еще более значительны. Углеводородные месторождения, разведанные на арктическом шельфе, удваивают общие запасы этого сырья в смежной Евразии. Несомненно, природно-ресурсный потенциал Арктики не только далек от истощения, но даже не до конца разведан и изучен, и России предстоит необозримо долго и обильно “прирастать” его разведанными и новыми, еще не открытыми стратегическими ресурсами.

Русские осваивают Арктику на протяжении многих веков, занимаясь здесь с незапамятных времен охотничьим и рыболовным промыслом (вместе с малочисленным местным населением), позже выполняя первопроходческую, просветительскую и научно-исследовательскую миссию. Первыми очагами современной промышленности на Севере были, вероятно, деревообрабатывающие и судостроительные мастерские, а затем Петровские заводы и верфи Архангельского Севера. Масштабное индустриальное освоение Севера началось с 30 гг. XX в., когда были открыты богатейшие месторождения полиметаллических, апатитовых и нефелиновых руд на Кольском п-ове и здесь возникло первое мощное горнопромышленное производство. В северном Приуралье были разведаны и начали разрабатываться Воркутинские каменноугольные месторождения. В низовьях Енисея возник мощный Норильский полиметаллический горнопромышленный гигант. Затем индустриализация постепенно распространялась на север Западной Сибири, вслед за открытием здесь богатейшей нефтегазовой провинции. Горнопромышленные узлы выросли в Восточной Сибири и Якутии на базе алмазосных кимберлитовых трубок, золотоносных, касситеритовых и многих других месторождений. Индустриальная экспансия не миновала Чукотки, где ныне работают Певекский и Валькумейский горнообогатительные комбинаты, разрабатываются золотоносные и другие месторождения. В западном секторе Российской Арктики развивается деревообрабатывающая и целлюлозно-бумажная промышленность, и главным ее центром является Архангельский район. Таким образом, промышленные комплексы возникали и развивались на всем протяжении арктической

приморской зоны России. Со временем первоходческие предприятия разрастались в промышленные районы и зоны, такие, например, как нефтегазоносная провинция Западной Сибири, инфраструктура которой простирается от умеренных широт до акватории арктического шельфа. Не менее обширные пространства охватила алмазодобывающая промышленность Восточной Сибири.

Энергоснабжение промышленных центров Арктики достаточно диверсифицировано с учетом региональных энергетических источников и потребностей. На Кольском п-ове работают гидро-, теплоэлектростанции и атомная электростанция. Восточная часть европейской Арктики обеспечивается воркутинскими углями, а также месторождениями нефти Республики Коми и Ямало-Ненецкого автономного округа. Энергетика севера Западной Сибири основана на использовании нефтегазовых источников, а также на энергии Усть-Хантайской гидроэлектростанции. В восточном секторе евразийского Севера работают несколько гидроэлектростанций и множество мелких теплоэлектростанций.

Население Российской Арктики до последнего времени было наиболее многочисленным по сравнению с аналогичными зарубежными районами, хотя начиная с 1990 гг. рыночная экономика вместе со сменой производственных отношений вызвала серьезную трансформацию производительных сил, отток нетрудоспособной и незанятой части населения в более комфортабельные для проживания области России. Вероятно, с дальнейшим развитием производственно-территориальных комплексов в Российской Арктике будет происходить переформирование профессионального типа населения, качественно и количественно соответствующего технологическим требованиям производственного и сервисного секторов. Причем очень важно было бы найти оптимальное сочетание между постоянным населением арктических городов и поселков и производственным персоналом, работающим в вахтовом режиме. Очевидно, что количество, производственные и социально-бытовые условия населения должны учитываться при изучении и планировании экологической обстановки в осваиваемых районах Арктики. Можно также полагать, что малые народы Арктики будут принимать ограниченное участие в промышленном развитии Арктики, оставаясь в основном в рамках своего традиционного социально-бытового уклада, который следует модернизировать очень осторожно и продуманно. Безусловно, количество, быт и профессиональная ориентация населения в районах интенсивного промышленного развития должны стать важнейшим аргументом изучения, планирования и обеспечения геоэкологических требований.

Выше мы привели лишь беглый очерк истории и проблем дальнейшего развития индустриализации Российской Арктики, главным образом прибрежной зоны Арктического бассейна. Тем не менее из сказанного очевидно, что в рассматриваемом регионе сформировалась и развивается крупная промышленность, прежде всего горнодобывающая, лесная, целлюлозно-бумажная и ряд других производств.

Техногенное освоение Арктики сопровождается техногенными воздействиями на природную среду, возникновением и усложнением геоэкологических проблем в осваиваемых районах.

ТЕХНОГЕННЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

По мере количественного и качественного развития и географического распространения промышленности в Российской Арктике нарастали масштабы, виды и энергетика техногенных воздействий на природную среду. Как ответная реакция возникали техногенные нарушения природных комплексов и естественного течения геоморфологических, мерзлотно-геологических и других процессов, увеличивались масштабы и разнообразие выбросов и стоков загрязняющих веществ в атмосферу и в гидросеть, активизировались деструктивные процессы, возникали явления дестабилизации энерго- и массообмена в природной среде. Формировались очаги, участки, территориальные и линейные зоны и ареалы, подвергшиеся частичной либо полной деградации и превратившиеся в техногенные бедленды или накопившие загрязняющие вещества, многократно превышающие предельно допустимые нормативы.

Возникла парадоксальная ситуация. Совсем недавно, в доиндустриальный период, Арктика была огромной малонаселенной страной с чистой природной средой, с сушей и морем, бронированными кристально чистым льдом. Лед по законам физики кристаллизации воды стремится избавиться от посторонних примесей, вытесняя их за пределы кристаллизующегося объема. Лед не образует с инородными примесями химических соединений и поэтому может считаться показателем естественной кристальной чистоты. Ледяная пустыня – эталон сурового и стерильно чистого мира.

Но недра Арктики оказались несметно богаты природными ресурсами. И с началом их разведки и разработки страна предельной чистоты, защищенная от человека дискомфортным климатом, труднодоступностью и малонаселенностью, стала вдруг беззащитной перед монстром индустриализации. Причем именно лед оказался тем уязвимым звеном, из-за которого несметные ресурсы недр неприступной Арктики привели ее на грань экологической катастрофы.

Экологические проблемы начали проявляться очень рано. Уже на стадии широкомасштабных геологоразведочных работ и предпроектных изысканий вся бескрайняя тундра оказалась вдоль и поперек исполосована гусеницами тракторов и вездеходов, захламлена брошенной техникой, бытовыми отходами и разливами горючесмазочных материалов. На участках с нарушенным почвенно-растительным покровом и, следовательно, теплообменом на поверхности земли немедленно активизировались деструктивные термокарстовые и термоэрозионные процессы. Другими словами, ударные методы эксплуатации ресурсов немедленно обострили противоречия между неуправляемым и безоглядным стремлением за максимальной и немедленной прибылью, с одной стороны, и чувствительной к внешним воздействиям природой – с другой. Неприступная, суровая Арктика оказалась бессильной перед современным “Железным Молохом” техногенеза, озабоченного комплексом покорения неподатливой природы.

ЭКОЛОГИЯ АРКТИКИ И ЛЕД

Между тем не только техногенные воздействия грозят экологическими катастрофами. Не менее, а может быть, и гораздо более негативные последствия для сложившегося равновесия природной среды Арктики могут возникнуть вслед за глобальными изменениями динамического равновесия ключевых агентов и продуктов природной среды Арктики: температурного баланса и соответствующего состояния и соотношения объемов воды и льда на поверхности Земли и в верхних горизонтах литосферы. Именно взаимосвязанный баланс и динамика триады лед–вода–температура обуславливают уязвимость и деструктивность мерзлотных геосистем под влиянием внешних воздействий. Лед – вещество, минерал и горная порода, играющая исключительную роль не только в Арктике, но и в планетарных процессах вообще и в зарождении и развитии жизни в частности. Низкие значения солнечной радиации, поступающей к поверхности околополюсного пространства Земли, определяют преобладание здесь в течение большей части года или круглогодично низких и отрицательных температур приземного воздуха и горных пород на ту или иную глубину. В результате из осадочной влаги формируются наземные льды, а грунтовая влага на глубину проникновения отрицательных температур переходит в твердое состояние, становится породообразующим минералом и горной породой и вместе с минеральной составляющей образует многолетнемерзлые породы.

Это явление, в свою очередь, в совокупности с отрицательными теплооборотах на поверхности Земли обуславливает специфику абсолютно

всех процессов и явлений, происходящих в криосфере. Наблюдается угнетенность почвенных, геохимических процессов и растительного покрова. Происходит замедление или прекращение процессов литификации и диагенеза пород в их общепризнанном понимании, возникает консервация воды и растворенных веществ в мерзлоте и выпадение их из естественного круговорота веществ на длительное время. Таким образом, обычные процессы литогенеза в мерзлой зоне литосферы сменяются криолитогенным типом породообразования – криолитогенезом [Попов, 1967]. Главным отличием многолетнемерзлых пород является крайняя замедленность или полная стабилизация всех процессов массообмена. Лед как минерал и горная порода обладает уникальными свойствами, обусловленными физикой его фазовых переходов, молекулярного и кристаллического строения. Лед – самый легкий и самый низкотемпературный минерал земной коры. Из этого обстоятельства вытекает ряд важных следствий. Во-первых, уникальная роль льда в зарождении и экологии жизни на земле. При кристаллизации воды происходит разуплотнение вещества, так как молекулы в узлах кристаллической решетки располагаются на больших расстояниях друг от друга, чем это имеет место при броуновском движении молекул и неустойчивости кластеров в жидкой фазе воды. В результате при кристаллизации объема воды лед становится легче жидкой фазы и плавает на ее поверхности, а не опускается на дно, как это случилось бы, если бы лед имел стандартные свойства всех твердых веществ становиться плотнее своей жидкой фазы. И только благодаря этому уникальному качеству льда океан, в котором зарождалась и развивалась жизнь, не подвергся полному вымораживанию за счет замерзающего на поверхности и опускающегося на дно льда, после чего развитие жизни стало бы невозможным. В этом заключается парадоксальность льда и его роли в биосфере: с одной стороны, лед – антагонист жизни. С другой, не будь на Земле льда и не обладай он именно теми свойствами, которые ему реально присущи, зарождение и развитие жизни на Земле оказалось бы невозможно. То есть лед и жизнь несовместимы в единой системе, но лед жизненно необходим на грани биосферы. Мало того, экологическое состояние Земли в очень большой степени определяется количественным соотношением воды и льда в их общем объеме, которое регулируется температурными условиями. Лед и вода – общающиеся сосуды в тепловой машине природы. Понижение температуры обуславливает направленный рост объемов льда и наступление эпохи оледенения. Напротив, потепление и таяние льда ведут к деградации ледниковых образований, трансгрессии и затоплению низменных районов Земли. *Фунда-*

ментальный природный треугольник – лед–вода–температура – координаты важнейших параметров и состояний, процессов и явлений в развитии косной и живой материи.

Как самый легкий минерал, лед в своем пространстве стремится к поверхности земли. Атмосферная влага, кристаллизуясь, образует скопления осадочных льдов, по мере накопления и метаморфизации превращающихся в различные формы наземного оледенения. Льды гидросферы также занимают сугубо поверхностное положение. И львиная доля подземных льдов локализуется в верхних 20–50 метрах литосферы. Следовательно, лед – наземный, подземный, морской, а также снежный покров, круглогодично существующий, хотя и меняющий пространственно свои ареалы в течение года, – самый широко распространенный в приповерхностных условиях земли минерал и горная порода. Все генетические формы природных льдов формируются в ландшафтной оболочке, так или иначе связаны с экзогенными географическими факторами и процессами, и поэтому глетчерные и подземные льды следует считать специфической горной породой и даже (с определенной долей условности) “географической горной породой”.

Другим уникальным свойством льда, благодаря которому он занимает крайнюю позицию в ряду геохимической дифференциации минералов земной коры [Шумский, 1955], является его низкотемпературность, т. е. лед имеет самую низкую из всех минералов температуру фазовых превращений. В силу этого природные льды любого генезиса и независимо от географической локализации даже в самых суровых климатических условиях находятся в диапазоне естественных температур, близких к точке плавления. Следовательно, природный лед как твердое тело неизменно находится в термодинамически неустойчивом состоянии. Механические свойства льда столь же своеобразны. Лед практически не имеет предела длительной прочности: ледяное тело способно выдержать достаточно большую, но кратковременную (моментальную) нагрузку. Если величина нагрузки превышает некоторый предел, наступает стадия хрупкого разрушения. Если же нагрузка будет незначительной, но воздействие продолжится дольше некоторого лимита времени, лед подвергнется пластическим деформациям. Чем ниже температура, тем уже диапазон упругой и пластической деформации и тем быстрее наступает стадия хрупких нарушений льда. Таким образом, лед как твердое тело не обладает ни термодинамической, ни длительной механической устойчивостью. *Отсюда следует, что все геосистемы криосферы, в состав которых входит лед в качестве минерала или горной породы, являются неустойчивыми как механически, так и термодинамически.*

Криосферу Арктики формируют многие виды природного льда. И при общем единстве природы всех льдов существуют определенные различия в значении каждого из них для геоэкологии Арктики.

КРИОСФЕРА И ГЕОЭКОЛОГИЯ АРКТИКИ

Криосферой называют оболочку Земли, в пределах которой температура опускается ниже 0 °С, а влага временно или постоянно переходит в твердое состояние. В Арктике подошва криосферы располагается ниже поверхности земли и криосфера состоит из трех частей: атмосферной (с верхней границей на высоте 100 км), гидросферной, представленной морскими льдами, и литосферной с нижней границей на глубине, возможно, до 1500 м. В криосфере выделяют наземное оледенение, которое в Арктике занимает значительную площадь арктических архипелагов и высокогорья, морское оледенение и подземное оледенение – криолитозону, или толщу многолетнемерзлых пород. Границы и теплофизическое состояние криосферы испытывают непрерывные колебания различного периода и амплитуды. Эти колебания имеют естественную природу и, безусловно, оказывают существенное влияние на экологическую обстановку в Арктике. Но они могут приобрести новые масштабы (вплоть до катастрофических) под влиянием естественных флуктуаций параметров природной среды или антропогенных воздействий.

В строении криосферы Арктики наблюдается асимметрия. Наземное оледенение развивается в арктических областях с морским типом климата, который обеспечивает обильные атмосферные осадки, главным образом в твердом виде, последовательное накопление которых и приводит к формированию ледниковых образований на поверхности земли. Наоборот, подземное оледенение тяготеет к областям с континентальным климатом. В этих условиях относительно небольшое количество осадков успевает стаять за короткий, но достаточно теплый летний период, а резкое и длительное зимнее охлаждение обеспечивает сохранение отрицательно-температурных пород верхних горизонтов литосферы на геологические интервалы времени.

Области наземного оледенения Арктики почти не освоены хозяйственной деятельностью, поэтому в их границах современные экологически неблагоприятные ситуации практически отсутствуют, за исключением лавин и айсбергов, при случайных столкновениях с которыми человек подвергается смертельной опасности. Однако состояние и динамика наземного оледенения имеют существенное общепланетарное значение для экологии Земли, как было отмечено выше. Выполненные, хотя далеко не полные, наблюдения за дина-

микой арктических ледников свидетельствуют, что в настоящее время большинство ледников имеет тенденцию к сокращению. Расчетные модели, основывающиеся на прогнозных оценках климатических изменений, показали, что темпы таяния арктических ледников могут привести к подъему уровня моря в 2100 г. всего на 5–6 см. Однако совершенно очевидно, что не может быть изолированного таяния только арктических ледников. Наоборот, климатическое потепление неизбежно будет сопровождаться таянием ледниковых покровов на всей Земле. И в этом случае подъем уровня моря будет значительно более масштабным. Если окажется справедливым один из многих сценариев климатических изменений в ближайшие десятилетия и глобальная температура повысится на 1,5–2,0 °С, уровень Мирового океана только за счет его температурного расширения может повыситься на 20–50 см. Из-за таяния арктических ледников уровень Мирового океана в ближайшие десятилетия повысится на 10–15 см [Котляков, 1994]. В результате удвоения площади абляции Гренландского ледникового покрова его поверхность будет снижаться ежегодно на 0,3–0,6 м, а уровень Мирового океана только по этой причине повысится на 5–10 см. Но самые грандиозные, а для некоторых арктических регионов катастрофические изменения возникнут, если начнется деградация ледникового покрова Антарктиды. Распад ледников Западной Антарктиды, например, способен привести к повышению уровня океана на 5,5 м. В настоящее время подъем уровня океана составляет примерно 1 см в год, но вполне возможны сценарии более масштабных природных изменений. Натурные наблюдения и расчетные модели, основанные на прогнозных климатических оценках, свидетельствуют об устойчивой тенденции сокращения площади морского льда в течение последних десятилетий, начиная с 30 гг. XX в. и вплоть до настоящего времени. Если эти результаты наблюдений и расчеты оправдаются и продолжится сокращение площади морского оледенения, то в результате улучшатся навигационные условия в Арктических морях. Возможны и некоторые иные положительные для человеческой деятельности эффекты. Вместе с тем увеличение площади и длительности сезона открытого моря в Арктике приведет к интенсификации термоабразии и темпов отступления берегов. Что касается условий будущего обустройства добычи и транспортировки углеводородного сырья на арктическом шельфе, то они вряд ли улучшатся сколько-нибудь значительно, так как дрейфующие поля морского льда немногим более благоприятны для буровых установок и транспортных коммуникаций, чем сплошной и постоянный морской лед.

Прибрежная суша Арктики на больших пространствах представлена низменными террито-

риями, в сложении которых принимают участие сильнольдистые грунты. С подъемом уровня моря и потеплением климата активизируются процессы термоабразии и протаивания мерзлых пород, что в совокупности приведет к повышенным темпам трансгрессии и затопления огромных прибрежных территорий.

КРИОЛИТОЗОНА И УСТОЙЧИВОСТЬ ЕЕ ГЕОСИСТЕМ

Криолитозона – область распространения многолетнемерзлых пород – образует самое нижнее и наиболее южное звено криосферы, распространяясь в Восточной Евразии вплоть до умеренных широт. И поскольку это территория активной деятельности человека, мерзлота играет существенную роль в состоянии и динамике экологических проблем Арктики.

Представления о реакции мерзлоты на прогнозируемое климатическое потепление представляются довольно противоречивыми. Так, следует опасаться широкого распространения просадок и других деформаций грунта и соответствующих катастрофических последствий для любых инженерных сооружений, для которых такие грунты служат фундаментом. Деструктивные процессы будут особенно масштабными при протаивании сильнольдистых пород и пород, содержащих залежеобразующие льды. Но территории, сложенные малольдистыми грунтами, по-видимому, не подвергнутся деформациям. Грубодисперсные грунты после протаивания и исчезновения мерзлотного водоупора будут лучше дренироваться, а поверхность избавится от заболачивания. Все зональные границы криолитозоны сместятся в сторону более высоких широт, климатические условия смягчатся, станут более комфортными для человека, а территории, пригодные для сельского хозяйства, расширятся. В целом же реакция разных регионов криолитозоны на климатические изменения может сильно различаться и зависеть от строения мерзлоты, которое, в свою очередь, определяется зонально-климатическими условиями формирования мерзлых пород.

Причиной формирования пространственной структуры и временной динамики мерзлой зоны литосферы являются отрицательные теплообороты на поверхности Земли [Сумгин, 1937; Достовалов, Кудрявцев, 1967; Попов, 1967], которые меняются зонально и регионально. Соответственно, наблюдаются закономерные изменения параметров многолетнемерзлых пород в географическом пространстве: среднегодовой температуры, мощности мерзлой толщи, типа промерзания (сингенез, эпигенез), глубины сезонного протаивания и промерзания и других характеристик, значение которых определяется внешними климатическими факто-

рами. Однако криолитогенный результат промерзания (генетический тип и объем подземного льдообразования), а также ряда других мерзлотных явлений обуславливается не только внешними факторами, но и самим субстратом, в котором развиваются все криолитогенные процессы. Е.М. Катасонов [1965, 1973] сформулировал понятие мерзлотно-фациального анализа, полагая, что характер льдовыделения в четвертичных отложениях определяется морфогенетическими условиями промерзания. Выделение фаций мерзлых горных пород следует производить по их строению и условиям промерзания [Дубиков, Аксенов, 2003]. Но поскольку формирование литогенетического субстрата не подчиняется законам зональности, строение и пространственно-временная динамика подземного оледенения несут одновременно черты, обязанные как внешним (зонально-климатическим), так и внутренним (литогенным) азональным факторам. Следовательно, можно считать, что все разнообразие мерзлотных процессов и явлений, все особенности их вариаций во времени и в географическом пространстве описываются интерференцией зональных и азональных факторов. Необходимо также учитывать, что наблюдаемая ныне структура криолитозоны не может строго подчиняться современным зональным границам, так как криолитогенные образования в разрезе мерзлой толщи формировались в разные исторические эпохи, климатические условия которых могли существенно отличаться от современных.

Схему зональности льдообразования в криосфере разработал П.А. Шумский [1955]. Мерзлота литосферы занимает в этой схеме нижнее звено – зону конжеляционного льдообразования. Свое понимание принципов зональности криолитозоны привел А.И. Попов [1967]. Теоретическую, абстрагированную от мозаики реальной картины схему пространственной структуры предложил В.И. Соломатин [1981, 1986], выделив три подзоны мерзлых пород Евразии. Широтные границы определяются в этой схеме последовательным выклиниванием в сторону умеренных широт верхних ярусов подземного льдообразования: вначале яруса сингенетических льдов, затем льдов горизонта активного криолитогеоза.

Криогенез мерзлой зоны литосферы обуславливается фазовыми переходами воды в грунтах и выражается, прежде всего, в подземном льдообразовании, в формировании генетических типов подземного льда, его масштабе, особенностях географического распространения и залегания в мерзлой зоне литосферы. Поэтому под структурой криолитозоны следует понимать дифференциацию в геологическом времени и географическом пространстве генетических типов подземного оледенения. Сочетание литолого-фациальных и зонально-кли-

матических факторов осадконакопления и промерзания обуславливают формирование закономерно распределенных в структуре криолитосферы иерархически построенных криолитогенных формаций, объединяющих, в свою очередь, определенный набор фаций более мелкого масштаба.

Ключевой характеристикой устойчивости геосистем арктической суши, как следует из приведенного выше анализа свойств льда как минерала и горной породы, является подземное льдообразование. Чем больше льдистость мерзлых пород и чем ближе к поверхности залегает подземный лед или льдистая порода, тем менее устойчива данная мерзлотная геосистема. Максимальной льдистостью обладает верхний ярус синкриогенеза самой высокоширотной приморской части криолитозоны [Соломатин, 1986]. Именно здесь располагаются самые высокольдистые криогенные образования – формация ледового комплекса и формация погребенных глетчерных льдов. Деграция геосистем этих формаций, развитие здесь термокарста и термоэрозии под влиянием естественных изменений внешних условий их функционирования или в результате техногенных воздействий неизбежно приведет к их полной и необратимой деградации. Поэтому территории и участки прибрежной арктической суши, сложенные указанными криогенными формациями, наименее пригодны для хозяйственного использования и должны быть отнесены к категории потенциально неблагоприятных для землепользования в планах хозяйственного освоения этих территорий.

ПРИНЦИПЫ СТАБИЛИЗАЦИИ ГЕОСИСТЕМ КРИОЛИТОЗОНЫ

До 30 гг. XX в. освоение Севера сводилось в основном к потреблению рыбных и охотничьих запасов и лесных ресурсов. Природа защищала себя естественным путем: истощением запасов в местах чрезмерной добычи и прекращением промысла. Продолжение добычи становилось возможным только после самовосстановления рыбных и охотничьих угодий. С началом периода индустриального природопользования начался этап не имеющей аналогов в истории и мировой практике полномасштабной эксплуатации природы Арктики. Экологические проблемы никого не интересовали.

Однако когда фундаменты под инженерными сооружениями начали деформироваться, здания оседать в термокарстовые провалы, дороги размываться термоэрозией, а земли вокруг поселений превращаться в бедленды и непролазную грязь, азарт немедленной и максимальной прибыли любой ценой (за счет природы, в первую очередь) постепенно начал сменяться осмыслением неприемлемости идеологии безоглядного потребления. Неизбежность соблюдения экологических норм

объяснялась не столько чувством вины перед искаленной природой, сколько чисто экономическими соображениями. Ремонт и восстановление неправильно возведенных сооружений, бесконечная замена ломающихся на бездорожье машин, борьба с овражной эрозией, другие дорогостоящие в Арктике вынужденные меры «обороны» от агрессивной природной среды – все эти повторяющиеся ремонтно-восстановительные работы стали многократно превышать по стоимости дорогие, но тщательно разработанные проекты. Стало понятно, что значительно выгоднее строить и эксплуатировать объекты так, чтобы весь технологический процесс был направлен не на победу над антагонистической природной средой, а если не на гармонию с ней, то хотя бы на устранение непримиримых и деструктивных противоречий, на минимизацию нарушений естественных процессов и состояний природы. Оказалось очевидным, что технология природопользования, сложившаяся в индустриально развитых районах благоприятной для хозяйственной деятельности природно-климатической зоны, должна быть модифицирована с учетом специфики природных условий Арктики. По-видимому, первой успешной адаптацией стали свайные фундаменты зданий вместо традиционных котлованов и железобетонных оснований. Другим характерным технологическим новшеством была прокладка теплокоммуникаций не в траншеях, а в утепленных коробах, проложенных по поверхности земли или поднятых на свайные основания. К настоящему времени найдены многочисленные северные варианты строительства и эксплуатации гражданских, промышленных и линейных сооружений. Они все еще не могут решить экологические проблемы исчерпывающе, но общие принципы экологизации индустриального освоения Арктики понятны.

Все виды хозяйственной деятельности, так или иначе, связаны с механическим, энергетическим или геохимическим вмешательством в природу. Вне пределов криолитозоны природно-территориальные комплексы имеют сравнительно высокий потенциал экологической стабильности, прежде всего за счет самоочищения в процессе природного круговорота веществ. Чисто энергетические воздействия (за исключением катастроф черномыльского масштаба) не нарушают функционирования природных комплексов. Водообмен поверхностных и подземных вод, биотические процессы способны к ассимиляции и очищению твердых и растворенных загрязняющих веществ техногенного происхождения. А механические воздействия (карьеры, насыпи, фундаменты, сведение почвенно-растительного горизонта, перераспределение поверхностного и подземного стока и т. д.) должны быть очень мощными, чтобы привести к неблагоприятным экологическим последствиям.

Иное дело в криолитозоне. При любых видах хозяйственной деятельности неизбежно нарушение почвенно-растительных покровов и верхних горизонтов пород. В результате возникает цепная реакция процессов: нарушается теплообмен между атмосферой и литосферой – возрастает мощность слоя сезонного протаивания – начинается таяние залежеобразующего льда или льдонасыщенного горизонта – возникают деформации просадки – развивается заболочивание – происходит активизация либо термокарста, либо термоэрозии. В результате все, что построено, разрушается, земля превращается в бедленд и становится непригодной для эксплуатации. Агрессия мерзлоты вызывает, как правило, миграцию свободной и связанной грунтовой влаги и сегрегационное льдонакопление, что также ведет к деформациям пучения грунтового основания и возведенного на нем сооружения.

Геохимические отходы индустриального производства в Арктике опасны тем, что мерзлота отключает действие естественных фильтров самоочищения и выноса вредных веществ подземными водами. В результате вредные отходы либо скапливаются на кровле мерзлоты и даже временно консервируются в мерзлоте, либо начинают перемещаться надмерзлотными водами и эоловыми процессами и накапливаются в водоемах промежуточного или конечного стока. В конце концов, они оказываются в Арктическом бассейне и могут аккумулироваться в приустьевых зонах или в зонах конвергенции течений и потока морских наносов. В Северном Ледовитом океане существуют устойчивые течения и траектории дрейфа морского льда. Значительная масса дрейфующего льда выносится в Гренландское море и северную часть Атлантического океана, где льды тают и, так или иначе, сгружают вмороженный в лед материал. Здесь, по-видимому, может возникать специфическая зона осадконакопления.

Источники индустриальных выбросов вредных веществ в атмосферу в Российской Арктике имеют очаговое распространение в соответствии с географией металлургических и целлюлозно-бумажных комплексов. Их разнос определяется розой ветров в том или ином районе. Выбросы оказывают мощное воздействие на деградацию биоты в районе своего источника. Атмосферные и другие пути переноса вредных аэрозолей плохо предсказуемы и недостаточно изучены. Наши наблюдения в районе Норильского комбината показали, что интенсивность выпадения вредных веществ резко убывает на первых десятках километров от источника и быстро приближается к фоновому значению.

Из сказанного вытекают принципы арктической экологически адаптированной технологии хозяйственной деятельности.

Во-первых, в любом виде хозяйственной деятельности при планировании, строительстве и эксплуатации любого промышленного, муниципального или линейного объекта следует неукоснительно соблюдать принцип паритета экономических и экологических требований [Моргунов, 2005]. Невозможно предпочесть экономическую выгоду проекта в ущерб экологическому смыслу, ибо экологический сбой, например активизация деструктивных процессов в результате экологически неправильного решения, неизбежно повлечет экономический ущерб из-за деформации фундаментов и выхода из строя возведенных в таких условиях строений.

Во-вторых, необходимо стабилизировать процессы теплообмена между атмосферой и литосферой так, чтобы слой сезонного протаивания не достигал глубины залегания льда и льдистых горизонтов. Эта задача решается разными методами: подъем зданий на сваи и оборудование проветриваемых подвалов, теплоизоляционные покрытия между мерзлым грунтом и возводимым сооружением, насыпи из грубообломочного грунта в качестве фундамента. В-третьих, следует предусматривать организацию поверхностного стока таким образом, чтобы избежать заболачивания и образования искусственных водоемов на участках землепользования, чтобы предотвратить активизацию термокарстовых процессов. То есть снова речь идет о задачах и методах соблюдения тепло- и влагобаланса на поверхности земли. В-четвертых, придется полностью отказаться от гусеничного транспорта и бездорожного движения по тундре, так как неизбежные колеи на хрупком тундровом покрове – гарантированная причина термоэрозии и последующих деструктивных процессов. Строительство дорог из доброкачественного грунтового материала – самый простой и неременный путь к стабильности геосистем криолитозоны. В-пятых, следует тщательно выбирать участки для складирования твердых отходов производства, чтобы обеспечить их надежную изоляцию от размыва, разноса, дефляции и, по возможности, максимально быструю консервацию в мерзлой толще. Наконец, каждый проект землепользования должен включать как обязательную часть рекультивацию нарушенных земель или организацию охраняемых территорий, заповедников, заказников и других форм компенсации изъятых из природы площадей.

Учитывая стоимость любого строительства и сопутствующих мероприятий в Арктике, мы полагаем, что здесь должен действовать универсальный принцип максимально возможной компактности всех проектируемых и возводимых строительных объектов. Другими словами, необходимо соблюдение требования минимизации по размерам, высотности, разбросанности производствен-

ных и жилых зданий и сооружений, протяженности дорожных и других линейных сооружений. При освоении прибрежной суши и размещении здесь технических, портовых, гидротехнических и других сооружений очень важно уделять внимание учету динамики береговой линии и при необходимости соответствующим берегоукрепительным мероприятиям.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итак, есть надежные способы избежать экологических катастроф и критических ситуаций при освоении природных ресурсов и постиндустриальном развитии Арктики. Для этого необходимо использование всего имеющегося научного багажа мерзлотоведения и геоэкологии криолитозоны, а также надлежащее соблюдение всех северных технологий строительства и эксплуатации муниципальных, промышленных и линейных сооружений.

Может быть, еще более важным для экологического благополучия Арктики было бы осознание того, что это часть страны, где нам не только ресурсы черпать, но жить, а значит, обустраивать и производство, и природу, и быт. Для будущего Арктики принципиально важен правильный выбор нескольких первых стратегических проектов развития, которые, возникнув как важная составная часть на этапе начавшейся масштабной эксплуатации месторождений углеводородов на суше и на шельфе, эффективно продолжили бы стратегию высокотехнологического развития Арктического региона России, используя его другие немалые природные ресурсы. Одним из подобных проектов, который крайне важен и для экологически, и для экономически правильно организованной добычи сырья, и для его транспортировки, и для постиндустриального (после исчерпания нефтегазовых запасов) развития Арктики мог бы стать оборудованный по последнему слову техники СМП с современными портовыми, навигационными, сервисными и прочими службами. Кроме чисто транспортных услуг, которые, несомненно, были бы высокорентабельны, порты СМП стали бы очагами развития малого и большого бизнеса по ремонту судов, складирования товаров, гостиничного и прочего обслуживания экипажей и пассажиров. Приустьевые индустриальные центры послужили бы также для организации иных видов производства, например, деревообрабатывающих комплексов в устьях северных рек, по которым можно было бы сплавливать лес в неограниченном количестве, вовлекая тем самым в производственную сферу огромные внутренние территории бассейнов рек.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 05-05-64883).

Литература

- Агранат Г.А.** Изучение и использование природной среды на зарубежном Севере // Проблемы Севера. М., Изд-во АН СССР, 1973, вып. 18, с. 27–42.
- Достовалов Б.Н., Кудрявцев В.А.** Общее мерзлотоведение. М., Изд-во Моск. ун-та, 1967, 403 с.
- Дубиков Г.И., Аксенов В.И.** Геокриологический словарь. М., ГЕОС, 2003, 217 с.
- Катасонов Е.М.** Мерзлотно-фациальные исследования многолетнемерзлых пород и вопросы палеогеографии четвертичного периода Сибири // Основные проблемы изучения четвертичного периода. М., Наука, 1965, с. 286–294.
- Катасонов Е.М.** Мерзлотно-фациальный анализ как основной метод криолитологии // II Междунар. конф. по мерзлотоведению: Докл. и сообщ. Якутск, ИМЗ СО АН СССР, 1973, вып. 3, с. 29–37.
- Котляков В.М.** Мир снега и льда. М., Наука, 1994, 286 с.
- Моргунов Б.А.** Методология учета экологического фактора в процессе выработки стратегии устойчивого развития Арктической зоны России: Автореф. дис. ... д-ра геогр. наук. СПб., 2005, 49 с.
- Попов А.И.** Мерзлотные явления в земной коре (криолитология). М., Изд-во Моск. ун-та, 1967, 304 с.
- Соломатин В.И.** Зонально-климатическая структура подземного оледенения // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География, 1981, № 2, с. 39–44.
- Соломатин В.И.** Петрогенез подземных льдов. Новосибирск, Наука, 1986, 215 с.
- Сумгин М.И.** Вечная мерзлота почвы в пределах СССР. М., Изд-во АН СССР, 1937, 379 с.
- Шумский П.А.** Основы структурного ледоведения. М., Изд-во АН СССР, 1955, 598 с.
- Arctic and alpine environments** / Ed. by J.D. Ives, R.G. Barry. London, Methuen, 1974, p. 43–67.

*Поступила в редакцию
4 сентября 2006 г.*