

## **АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ГЕОКРИОЛОГИИ (МЕРЗЛОТОВЕДЕНИЯ)**

**А.В.Брушков**

Кафедра геокриологии МГУ им.М.В.Ломоносова

Статья подготовлена в связи с Четвертой конференцией геокриологов России, посвященной 100-летию основателя кафедры геокриологии МГУ В.А.Кудрявцева. Описаны наиболее важные результаты исследовательских и практических работ по ведущим направлениям геокриологии за период после третьей конференции, обсуждаются некоторые актуальные задачи научных исследований на ближайшие годы.

## **ACTUAL PROBLEMS OF GEOCRYOLOGY (PERMAFROST SCIENCE)**

**A.V.Brouchkov**

Geocryology Department of Moscow State University

The article is prepared in relation to the 4th Russian Conference on Permafrost devoted 100th anniversary of V.A.Kudryavtsev, the founder of Geocryology Department of Moscow University. The most important results of the key fields of permafrost science and engineering are reported for the period after the 3rd Conference. The some tasks of future research are outlined.

Геокриология (мерзлотоведение) имеет большое значение в России, около 65% территории которой занято вечной мерзлотой. Кроме того, развитие экономики и социальной среды страны связано с освоением Арктики - нефтегазовых и других месторождений и созданием инфраструктуры Арктического побережья и шельфа, Якутии, Сибири и Дальнего Востока. Суровые природно-климатические и мерзлотные условия этих районов требуют адекватных научно-технических, проектных и организационных решений. Геокриология (мерзлотоведение) как наука, изучающая криолитозону, развивается уже около ста лет. Огромный вклад в ее развитие внесли М.И.Сумгин, В.А.Обручев, П.И.Мельников, Н.А.Цытович, В.А.Кудрявцев, А.И.Попов, Т.Певе и другие. Со своего основания она является геологической наукой, изучающей закономерности формирования и распространения криолитозоны, состав, свойства, строение, температурный режим горных пород в криолитозоне и связанные с ними криогенные геологические процессы и явления. Вместе тем значительный вклад в ее развитие внесли инженеры и геотехники в связи с

задачами масштабного строительства на мерзлоте в первой половине XX века.

Геокриология (мерзловедение) изучает мерзлые горные породы, т.е. породы, имеющие отрицательную или нулевую температуру, в которых хотя бы часть воды перешла в кристаллическое состояние (лед). Поэтому их состав и строение, а также тепловое состояние, связанное с теплообменом на поверхности Земли между литосферой и атмосферой, является важным предметом исследования. Образование мерзлых пород представляет собой часть осадочного процесса, а в общем случае – литогенеза. Его изучение имеет естественно-исторический и региональный аспекты, и обусловлено взаимодействием всех оболочек Земли, включая биосферу. Эволюция мерзлых толщ – составляющая глобальных природных изменений. Криолитозона распространена на суше всех континентов, на шельфе и островах Северного Ледовитого и Южного океана, на вершинах гор в экваториальной зоне, и занимает более 35 млн. км<sup>2</sup>. Из общей площади земной суши и шельфа почти 40% занято многолетней криолитозонной. Вместе с сезонным промерзанием эта площадь составляет более 60%. Значительный объем многолетнемерзлых пород занимает подземные льды, которые составляют до 50-60% объема пород ледового комплекса в умеренной зоне и до 80-90% в субарктических равнинах.

Мы являемся свидетелями значительных современных преобразований геологической среды, в том числе мерзлых толщ, обусловленных глобальным изменением климата, влиянием хозяйственной деятельности человека и природными процессами. Во многих регионах в последние десятилетия наблюдается повышение температур воздуха, сокращение размеров ледников, снежного и морского ледового покрова. На равнинах умеренной зоны Северного полушария в связи с деградацией мерзлоты термокарстовым процессом охвачено до 20-30%, на субарктических приморских равнинах до 70% и более территории с ледовым комплексом. В геокриологии выступают в виде самостоятельных несколько научных дисциплин, которые будут последовательно рассмотрены.

Задачей физики, химии и механики мерзлых пород является исследование природы и закономерностей развития физико-химических, механических и теплофизических процессов в промерзающих, мерзлых и оттаивающих породах. Мерзлая порода представляет собой динамичную физико-химическую систему, включающую три фазы влаги (незамерзшую воду, лед и пар), которые находятся в неравновесном состоянии и способны к взаимным переходам. Особенности этих процессов влияют на условия возникновения и распространения многолетнемерзлых пород (ММП) и развития криогенных процессов и явлений. В последнее время получены некоторые новые результаты в этой области. В частности,

изучены особенности состава незамерзшей воды для различных видов мерзлых пород, даны оценки миграционной способности воды, водных растворов и химических соединений, в том числе нефти и ее продуктов в мерзлых породах и почвах (ИМЗ СО РАН, Якутск, ИКЗ СО РАН, Тюмень, кафедра геокриологии МГУ и другие). С помощью разработанной расчетной модели установлены количественные закономерности изменения свойств горных в мерзлом и талом состояниях в зависимости от влажности, плотности, содержания органического вещества (ИМЗ СО РАН и др. На основе экспериментальных исследований изучено влияния оттаивания (промерзания) пород на гидратосодержание пород, получены данные по самоконсервации газовых гидратов в мерзлых породах (ВНИИГаз, ИКЗ СО РАН, Тюмень, кафедра геокриологии МГУ и другие) На основе представлений о термофлуктуационном процессе разрушения мерзлых грунтов получены параметры прогнозного уравнения длительной прочности засоленных мерзлых грунтов. Для засоленных и других мерзлых пород установлены закономерности формирования их состава, строения, распространения и свойств (ИКЗ СО РАН, Тюмень, Фундаментпроект, кафедра геокриологии МГУ). Однако широкий круг актуальных научных задач остается нерешенным.

Для засоленных мерзлых пород и криопэгов морского генезиса актуальна разработка методики оценки температурных условий формирования их ионно-солевого состава, включая комплекс программ для расчета их температурного и водно-ионного режима и соответствующую базу данных. Намечается развитие исследований в направлении исследования природы деформирования и разрушения мерзлых и оттаивающих грунтов, в том числе, сильнольдистых, засоленных, заторфованных, содержащих нефтяное загрязнение. Следует разработать предложения для прогноза несущей способности оснований сооружений, возводимых в криолитозоне, включая рекомендации по назначению их расчетных характеристик. Необходимы развитие представлений о природе и закономерностях криогенного промерзания и пучения пород, механизмах их теплового и механического деформирования и разрушения, создание общей теории формирования прочностных и деформационных свойств мерзлых пород. Важно разработать физико-химические и геологические модели формирования и трансформации газогидратных образований в криолитозоне. Необходимо изучить условия накопления газогидратов, закономерностей формирования состава, строения и свойств мерзлых гидратосодержащих пород, выявление роли фазовых переходов вода-лед в горных породах в процессах газогидратообразования, оценка метастабильности газогидратных образований, оценка эмиссии парниковых газов при разложении внутримерзлотных газогидратов.

Динамическая геокриология изучает тепловое состояние

поверхности Земли и верхних слоев литосферы и факторы, влияющие на его изменение. Разработка термодинамических и теплофизических основ формирования толщ мерзлых пород базируется на изучении теплообмена в системе «атмосфера—литосфера», температурного режима и фазовых переходов влаги в горных породах. Поэтому исследование динамики толщ мерзлых пород во времени и пространстве возможно только при рассмотрении связи тепловой стороны процессов промерзания и протаивания пород с геологическими и географическими условиями среды, в которой они происходят. Другой важной частью динамической геокриологии является изучение и прогноз криогенных геологических процессов, результатом которых становятся специфические явления — криогенные формы рельефа и криогенные образования, такие как морозобойные трещины, подземные льды, бугры пучения, курумы, солифлюкционные формы, термоэрозионные овраги, наледи и другие. В целом моделирование и аналитические методы изучения криогенных процессов имеют большое значение для определения направления развития и скорости изменения геокриологических условий.

В.А. Кудрявцев в 1954г. подчеркивал, что «климат – первая и основная причина образования и существования вечной мерзлоты, обуславливающая возможность самого явления и качественно определяющая потенциал вечномерзлой толщи. Геолого-географические условия – вторая причина образования и существования вечной мерзлоты, определяющая при данных климатических условиях все возможные колебания, как самой критической температуры образования вечной мерзлоты, так и ее потенциал холода». Поэтому исследование мерзлотных условий включает изучение климатических и ландшафтных характеристик, и их динамики. Для оценки реакции многолетнемерзлых горных пород на изменение климата продолжается формирование мониторинговой геокриологической сети на Северо-Востоке Азии. При поддержке международного проекта TSP и других оборудовано ряд станций (ИМЗ СО РАН, Якутск, ИКЗ СО РАН, Тюмень, ИГ РАН, кафедра криолитологии и гляциологии МГУ, кафедра геокриологии МГУ и другие), в том числе работающих в автономном режиме. Аналогичные станции действуют на Аляске (Ун-т Аляски, Фербенкс), в Канаде (Геологическая служба, Оттава), Китае, Монголии, Швейцарии и других местах. Важно, однако, проведение собственно температурных измерений в комплексе с ландшафтно-климатическими, почвенными, гидрогеологическими, криолитологическими исследованиями, а также в связи с влиянием деятельности человека. Это продолжает оставаться крайне актуальной задачей для таких станций. В период с 2003 по 2007 гг. отмечено повышение температуры грунтов в различных ландшафтных условиях в Якутии: на 0,5-6,0 °С - на подошве деятельного слоя и на 0,2-3,50 °С - на подошве слоя годовых теплооборотов, увеличение мощности сезонно-

талого слоя на пониженных участках рельефа местности (ИМЗ СО РАН, Якутск и другие). Подтверждено проявление положительного температурного тренда на территории Западной Сибири, в частности Уренгойского нефтегазоконденсатного месторождения (ИКЗ СО РАН, Тюмень) и других районах за последние десятилетия, при этом повышение температуры многолетнемерзлых пород происходит неравномерно как во времени, так и в пространстве. Установлено, что на побережье моря Лаптевых в последние три года произошло существенное ускорение темпов отступления берегов. Резкий пик скорости их разрушения приходится на 2007 год, превысив среднюю многолетнюю норму в 1,5-2 раза. На протяжении 13 503 км береговой линии морей Лаптевых и Восточно-Сибирского впервые получена средняя многолетняя скорость отступления берегов. Установлено, что более половины всего потока вещества в Северный Ледовитый океан (~ 150 млн. тонн в год) поступает из разрушающихся берегов морей Лаптевых и Восточно-Сибирского (ИМЗ СО РАН, Якутск, лаборатория геоэкологии Севера МГУ и другие). Установлено, что открытые (безлесные) криогенные ландшафты в Центральной Якутии за последнее десятилетие подверглись большим изменениям из-за повышения температуры грунтов в связи с современными изменениями климата. Заметно активизировался рост молодых термокарстовых озер, увеличивается объем воды в озерах (ИМЗ СО РАН, Якутск и другие). Таяние подземного льда повысило приходную составляющую водного баланса термокарстовых озер на 40-45 %. Выявлено повышение температур и деградация мерзлоты в районах Европейского Севера России (Коми территориальный Центр государственного мониторинга состояния недр) и Ямала (ВСЕГИНГЕО, ИКЗ СО РАН, Тюмень и другие), особенности развития современных криогенных процессов (ИМЗ СО РАН, Якутск, ИКЗ СО РАН, Тюмень, ИПРЭК СО РАН, Чита, ПНИИИС и другие). Развивается экологическая геокриология (ИМЗ СО РАН, Якутск, ИКЗ СО РАН, Тюмень, ИГ РАН, кафедра криолитологии и гляциологии МГУ, кафедра геокриологии МГУ, лаборатория геоэкологии Севера МГУ и другие)

В перспективе очевидна необходимость создания национального центра геокриологического мониторинга, координирующего и анализирующего деятельность ведомств предприятий и организаций в области стационарных наблюдений, прогноза и управления мерзлотными условиями на территории РФ. Предпосылками к его созданию являются  отсутствие согласованного регламента (рекомендаций) по проведению мониторинга геокриологических параметров, эпизодичность и несогласованность выполняемых сегодня наблюдений в криолитозоне; недостаточность анализа и отсутствие согласованных оценок происходящих изменений; современные международные тенденции к усилению контроля состояния природной среды, в том числе мерзлоты;

возможность привлечения инвестиций в рамках международных программ. Задачами такого центра могли являться: разработка и реализация национальной стратегии развития мониторинга криосферы; организация новых и возобновление остановленных ранее наблюдений на новом методическом уровне; создание базы данных о состоянии криолитозоны; обеспечение исходной информацией, анализом и прогнозами потенциальных пользователей; представление национальных интересов в международных организациях и программах.

В настоящее время существуют два основных подхода к прогнозу реакции мерзлоты на изменения природной среды: математическое моделирование и метод палеоаналогов. Первый подход основан на использовании заданных характеристик мерзлых пород и граничных условий и является, как правило, детерминистским. Применять его для прогнозирования природных катастроф в области криолитозоны можно только с ограничениями. Перспективным является развитие стохастических методов в этой области (ИГ РАН, кафедра геокриологии МГУ и другие). Очевидно, существует необходимость в разработке новой методологии количественного прогноза, основанной на сочетании детерминистских и вероятностных подходов. Прогнозы при этом целесообразно в будущем осуществлять на базе развития современных геоинформационных систем (ГИС).

Литогенетическая геокриология (криолитология) исследует особенности и закономерности формирования дисперсности, химико-минерального состава, строения и свойств мерзлых дисперсных пород и льдов на основе химических, физико-химических и физико-механических процессов, развивающихся в осадочных породах криолитозоны. В последнее время в этой области разработаны основы криолитологического анализа минерального вещества дисперсных отложений, позволяющие проследить воздействие криогенных процессов на горные породы (кафедра криолитологии и гляциологии МГУ и другие). Кроме того, составлена новая схема распространения ледового комплекса - специфических сильно льдистых пород, залегающих непосредственно ниже слоя сезонного оттаивания и охватывающие колоссальные площади от  $74-75^{\circ}$  с.ш. до  $57^{\circ}$  с.ш. и от  $108^{\circ}$  в.д. до  $154^{\circ}$  в.д. Изучено распространение ледяных и ледогрунтовых жил на севере Якутии, нивальные процессы (ИМЗ СО РАН, Якутск и другие), литогенетических особенности строения мерзлых пород (ИКЗ СО РАН, Тюмень и другие). Получены данные о значительном содержании газов и микроорганизмов в мерзлых толщах (ИФХБПП РАН, кафедра биологии почв МГУ, ИКЗ СО РАН, Тюмень и другие), которые имеют перспективу для исследования палеогеографических условий осадконакопления, стратиграфии, а также практического применения в биотехнологиях.

Региональная и историческая геокриология исследует широтно-

зональные, высотно-поясные, региональные и исторические закономерности формирования и развития геокриологических условий. Под геокриологическими условиями понимается комплекс параметров, характеризующих криолитозону. Это – распространение мерзлых пород по площади, условия их залегания в разрезе, состав, криогенное строение и мощность криолитозоны, среднегодовая температура пород, сезонное оттаивание, криогенные процессы и явления и другие характеристики. Предварительный анализ измерений температуры пород на глубине годовых теплооборотов показал, что за последние 30 лет во многих ландшафтных условиях отмечается повышение температуры пород в диапазоне от 0,4 до 1,3 °С (ИМЗ СО РАН, Якутск, ИКЗ СО РАН, Тюмень). При этом в последние три десятилетия термическое состояние верхнего слоя многолетнемерзлых пород, например, в Центральной Якутии до 2005 года было довольно стабильным (ИМЗ СО РАН, Якутск). Проведена пространственно-временная реконструкция мощности многолетнемерзлой толщи в различных геоморфологических областях Сибирской платформы в период от конца среднего неоплейстоцена до нашего времени. Установлено, что 125 тысяч лет назад температура пород была выше современной на 2-5°C, а многолетнемерзлые породы занимали менее 58% исследуемой территории (ИМЗ СО РАН, Якутск). В результате определений изотопно-кислородного состава донных отложений Тихого океана установлено, что 3,5 млн. лет назад началось похолодание климата, длившееся до начала плейстоцена. Вследствие этого 2,5 - 2,8 млн. лет назад в высокоширотных континентальных областях началось формирование наземного оледенения и криолитозоны. В плейстоцене изменения климата и процессы гляциации Земли приобрели автоколебательный характер с периодами 100 и 40 тыс. лет (ИМЗ СО РАН, Якутск, ИКЗ СО РАН, Тюмень). Изучена шельфовая мерзлота, прослежена эволюция полигональных и термокарстовых образований при переходе криогенных толщ на приморских низменностях в субаквальные условия, изучено их строение и современное состояние (ИМЗ СО РАН, Якутск, ИКЗ СО РАН, Тюмень, ИГ РАН, кафедра геокриологии МГУ).

Данные о глобальных изменениях природы Земли, включая великие оледенения и межледниковья прошлого, широко используются при реконструкциях палеоклиматов. Эти данные создают научную основу для оценки вероятности нового оледенения или теплого интергляциала, связанного с деятельностью человека. Они также необходимы для реконструкции истории Мирового океана, дрейфа литосферных плит, вертикальных движений земной коры, объяснения рельефа и строения отложений суши и моря. В перспективе важно создание геокриологической ГИС Российской Федерации, вероятно, в развитие существующей, созданной на кафедре геокриологии МГУ Геокриологической карты 1:2 500 000.

Инженерная геокриология представляет собой раздел практической геокриологии и занята инженерно-геологическим обеспечением проектирования, строительства и эксплуатации инженерных сооружений в криолитозоне для обоснования и выбора надежных и экономичных способов хозяйственного освоения территорий. По этому направлению составлена цифровая инженерно-геологическая карта на территорию Якутии масштаба 1:2 500000 с базой данных по физико-механическим свойствам грунтов (ИМЗ СО РАН, Якутск), а также карта России ВСЕГИНГЕО того же масштаба. Исследованы мерзлотные условия ряда новых районов добычи углеводородов (Фундаментпроект, ПНИИИС, Гипротюменнефтегаз, ВНИПИГаздобыча и другие), в том числе геофизическими методами (ИМЗ СО РАН, Якутск, ИКЗ СО РАН, Тюмень, ПНИИИС, кафедра геокриологии МГУ и другие). Развитие геофизических методов исследования имеет первостепенное значение. Необходимы современные программно-аппаратный комплексы для исследования вечной мерзлоты, включающие дистанционные методы (геоэлектрическая и радиоволновая томография, георадарные и каротажные методы, системы температурных, гидродинамических и резистивиметрических скважинных исследований), компьютерные программы обработки геолого-геофизических данных, построения разрезов и объемных (3D) геокриологических и инженерно-геокриологических карт, использование ГИС-технологий. Важно создание и развитие геофизических методов для изучения засоленных, сильнольдистых грунтов и повторно-жильных льдов, включающих электроразведку и высокоточную магниторазведку. Особенно важно развитие геофизических методов в связи с предполагаемым использованием в будущем Арктического шельфа.

Геокриологический прогноз и геоэкология криолитозоны направлены на решение таких задач, которые имеют, с одной стороны, социальное и практическое значение для изучения условий жизни людей и в целом живой природы в криолитозоне, а с другой - естественно-историческое значение, объясняющее объективные законы развития Земли, устойчивость изменения отдельных компонентов природной среды в криолитозоне к влиянию естественных и антропогенных факторов. Геокриологический прогноз является обязательной частью исследований мерзлых пород в связи с проявлением неблагоприятных последствий при любом освоении криолитозоны или в связи с естественной эволюцией природной среды. В.А.Кудрявцев в свое время впервые предложил использовать относительно простые аналитические решения задачи теплопроводности для целей прогноза температурного режима горных пород. Настоятельно необходима разработка нового программного обеспечения для расчета широкого круга тепловых задач геокриологии, предполагающего использование современных возможностей вычислительных средств. Не приходится сомневаться в том, что

основатель кафедры геокриологии МГУ и автор методологии мерзлотного прогноза сегодня поддержал бы выполнение этой задачи. Требуется совершенствование существующих нормативных документов, создание современной информационной базы свойств мерзлых грунтов, а также разработка соответствующих компьютерных программ для прогноза устойчивости инженерных сооружений и развития криогенных процессов.

С самого начала развития в геокриологии существовал определенное противоречие, связанное с жесткой обусловленностью формирования мерзлоты от температуры (климата) и неопределенность в реализации этой обусловленности, связанная с неоднородностью геолого-географической среды. Геокриология, впрочем, как и другие науки о Земле, столкнулась с проблемой, вытекающей из сути научного метода познания – дробления целого и изучения его по частям. П.Ф. Швецов, в частности отмечал: «Закономерности развития явлений теплообмена в системе почва - верхние слои атмосферы, процессов промерзания и протаивания почв и горных пород, в условиях возникновения и существования многолетнемерзлой подпочвы вскрываются значительно глубже, если почву и слои горных пород рассматривать как весьма сложные физико-химические системы, а не как изотропные и однородные твердые тела». Развитие в геокриологии было связано с использованием ландшафтных методов при проведении геокриологических и инженерно-геокриологических съемок. При этом выделение объектов все еще базируются в основном на последовательном наложении структурных, генетических, геоморфологических, климатических и ландшафтных характеристик на определенную территорию и последующем выделении однородных участков. При всей логичности этого подхода связи, определяющие существование геосистемы, вскрыть не всегда удается. Поэтому в будущем важно развитие качественных и особенно количественных методов исследования таких сложных взаимодействий, включая компоненты литосферы, водную и воздушную среды, а также биоту. Например, для проведения стационарных наблюдений в криолитозоне перспективна, в том числе, новая концепция «суперсайтов», позволяющих проводить максимально широкий комплекс исследований. Необходимо отметить, что новые методы биологии и аналитической техники обеспечивают возможности принципиальных открытий, особенно в применение к реликтовой биоте, и создание новых биотехнологий. Эти новые направления могут быть реализованы в рамках ресурсного, интегрального подхода, развиваемого в последние годы В.П.Мельниковым. В нем криосфера рассматривается не противопоставлении к инженерным или социальным задачам, а как источник полезных ресурсов, а в значительной мере – как естественная среда и основа жизнедеятельности человека.