# ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

## СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ГЕОКРИОЛОГИИ

**В.П.Мельников[1,2,4,5], А.В.Брушков[2,3], Д.С.Дроздов[2,4,5,6]**
[1] Тюменский научный центр СО РАН; [2] Институт криосферы Земли СО РАН;
[3] кафедра геокриологии МГУ; [4] Тюменский государственный университет;
[5] Тюменский государственный нефтегазовый университет; [6] Российский государственный геологоразведочный университет МГРИ-РГГРУ,

Рассматриваются основные проблемы криосферы на современном этапе, обсуждаются новые перспективные направления научных исследований и задачи сообщества геокриологов. В их числе динамика геологической среды, геокриологический мониторинг, геоинформационные технологии, ресурсы криосферы и другие.

## MODERN PROBLEMS OF GEOCRYOLOGY

**V.P.Melnikov[1,2,4,5], A.V.Brouchkov[2,3], D.S.Drozdov[2,4,5,6]**
[1] Tyumen Scientific Centre of Siberian Branch RAS; [2] Earth Cryosphere Institute SB RAS;
[3] Geocryology department of MSU; [4] Tyumen State University; [5] Tyumen State Oil and Gas University; [6] Russian State Geological Prospecting University MGRI-RSGPU

Basic problems of modern geocryology are considered, new perspective areas of research and tasks for geocryologists are discussed. Dynamics of geological environment, geocryological monitoring, GIS, cryosphere recourses and others.

### Введение

Геокриология (мерзлотоведение) не имела философского прошлого и создавалась на прочном фундаменте точных и естественных наук. В то время как еще в шестидесятых годах прошлого века она не числилась в перечне фундаментальных наук, ее старшая родственница – гляциология – берет как наука свое начало с конца XVIII в. Благодаря усилиям П.И.Мельникова и других удалось включить "мерзлотоведение" в число фундаментальных наук, правда в энциклопедиях добавляли "с большим практическим уклоном". Изначально мерзлотоведение шло от понятийной базы геологии и географии во многом не отступая от традиционных для этих наук целей и задач. На этом пути возникало и возникает много трудностей [10]. Создавая основы криософии, имея за спиной всевозрастающий массив информации о криогенных явлениях, процессах и образованиях во Вселенной, мы не вправе отталкиваться только от системы понятий сложившейся в геокриологии (мерзлотоведении) и даже в криологии Земли. Что касается нашего объекта холодного мира и в частности криосферы Земли, то градиентность ее показателей – прямо скажем, одно из самых заметных явлений влияющих на эволюцию среды. Пестрота показателей градиентных структур, а также градиентных структурно-фазовых состояний была ярко выражена в период последнего оледенения от 35 до 6 тысяч лет тому назад. Например, в максимуме оледенения на территории США (без Аляски), т.е. 20 тыс. лет тому назад, объем

ледника составлял примерно 37 млн. км$^3$, а в настоящее время осталось 87 км$^3$, т.е. объем изменился в 445 тысяч раз, убывая приблизительно по 2,2 тысячи км$^3$ в год. Много ли таких геологических факторов, которые на огромных территориях так воздействовали на лито-, гидро-, био- и атмосферу? Непрерывно в течении многих тысяч (а в более ранние оледенения – и миллионы, и десятки миллионов лет) они коренным образом изменяли среду. Толща ледника на территории США достигала 3 км и продвигалось со скоростью 30 м/год. Для сравнения вспомним скорость движения литосферных плит – это несколько сантиметров в год. Причина появления такого воздействия на среду – это понижение среднегодовой температуры примерно на 3°С.

Физики говорят: "при обычной температуре ничего удивительного не происходит. Чудеса любят холод". А оледенение, это не только произведение холода, но и чудодейственного вещества под названием "вода", свойства которой и происхождение до конца не раскрыты. Необычное поведение различных характеристик воды при изменении температуры от 0° до 100°С свидетельство ее уникальных свойств. Это увеличение плотности в диапазоне от 0°С до 4°С, а как известно большинство веществ при фазовом переходе твердого тела в жидкость уменьшают свою плотность. Вязкость воды при изменении t° от 0°С до 100°С уменьшается в 7 раз при том, что подвижность воды и ее вязкость обеспечивается весьма малой долей всех молекул. В диапазоне t° от 0°С до 100°С структура воды на 80% повторяет структуру льда и что молекулы в жидкой воде в среднем занимают положения и ориентации, соответствующие тетраэдрической структуре типа алмазов. Это также сверхохлаждение воды способной оставаться жидкой при температурах ниже точки замерзания, но при загадочной температуре -38° С она все равно превратится в лед, а при -120°С лед становится тягучим, а при -135°С он превращается в стекловидную массу или в твердое вещество с отсутствием кристаллов.

Криосфера контролирует существование и трансформацию всех форм живой и неживой материи, в значительной степени определяет экономическую и технологическую деятельность человека, социокультурные отношения, медико-биологическую обстановку в Арктике и Субарктике. Но процессы взаимодействия с атмосферой и океаном делают областью её влияния всю Землю. Климатические флуктуации влияют на животный и растительный мир, ведут к преобразованиям в криосфере. Горные ледники и горная мерзлота – очевидные фрагменты криосферы, которые можно встретить и в тропиках и в экваториальной зоне. А над землёй, в атмосфере замёрзшая вода циркулирует на высоте всего нескольких километров. Накапливающиеся в последние годы данные говорят, что глубина проникновения криогенных процессов существенно глубже нулевой изотермы – это глубина распространения в литосфере и в океанах газовых гидратов, создающих горизонты положительно-температурной криолитозоны. Важно, что эта часть криосферы Земли не зависит от современного климата, астрономических параметров и ландшафтных условий, а контролируется от палео- и современными термобарическими условиями.

Существование и строение земной криосферы обусловлено положением Земли в Солнечной системе и определяется соотношением потоков тепла, приходящих от Солнца и из недр. Появление в геологическом прошлом атмосферы создало условия, при которых граница фазовых переходов воды на значительной части суши и на прибрежной части шельфа периодически на разную глубину опускается в литосферу, с образованием сезонных или многолетнемерзлых пород или толщ (ММП или ММТ). Зависимость формирования состояния и структуры ММТ от астрономических, климатических и геолого-географических причин, а также от экранных эффектов, придает процессам формирования ММТ, их распространению и особенностям состояния и свойств – вероятностный характер [11]. Достоверные геологические

признаки существования мерзлоты на Земле фиксируются на протяжении примерно 1 млрд. лет, а разрозненные признаки относятся к ещё более древним эпохам – 2-2,5 млрд лет [9].

Усреднённые представления о структуре криосферы можно составить по рисунку 1. Тропосфера, в которой содержится до 90% атмосферной влаги имеет толщину от 8-10 км в полярных областях до 16-18 км на экваторе. Поверхностная криосфера (ледники, морской лёд) и подземная криосфера (вечномёрзлые или многолетнемёрзлые горные породы сосредоточены в основном в Арктике и Антарктике и лишь ограниченно – в горных районах умеренных и низких широт [9].

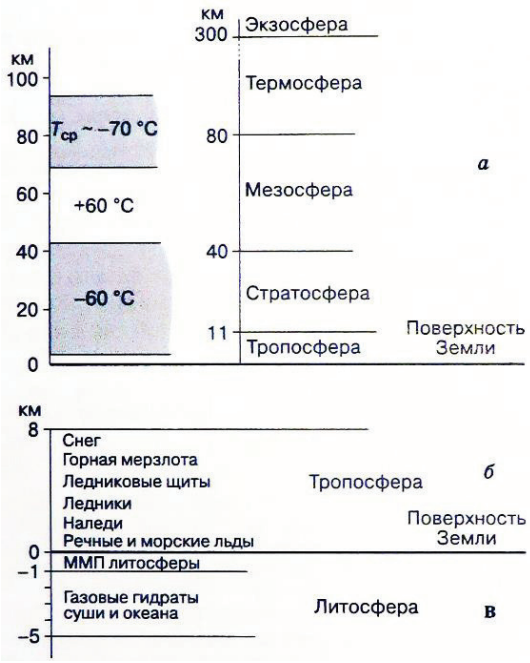



*Рис.1. Криосфера земли в вертикальном разрезе (а) над поверхностью Земли, (б) на поверхностью Земли, (в) в литосфере и гидросфере [9]*

Циклическая динамичность – характеристическая особенность криосферы градуса [30]. История Земли – это в том числе и непрерывная смена ледниковых эпох и межледниковий разной продолжительности и интенсивности, с крупнейшими из которых связывают и биотические перестройки. Уже второе столетие длится подъём температуры с градиентом 0,6…0,7° за сто лет. При этом лишь за последнее десятилетие из-за наложения климатических флуктуаций разной продолжительности средняя температура воздуха повысилась на несколько десятых градуса [13, 14].

Потепление последних десятилетий вызвало деградацию приповерхностных горизонтов мёрзлых толщ на юге криолитозоны и повсеместную активизацию опасных криогенных процессов, которые разрушают природные ландшафты, представляют опасность для хозяйственных объектов, могут создавать тревожную эпидемиологическую обстановку. Инженерная деятельность в Арктике и Субарктике усугубляет природные риски, и обществу приходится нести существенные затраты по ликвидации накопленного экологического ущерба. Отсюда интерес к вопросам пространственно-временной изменчивости, мозаичному строению, сложной ритмике и нестационарной динамике геологической истории многолетней мерзлоты и ландшафтов; а также физическим и химическим процессам в мерзлых горных породах и других криогенных образованиях, строительству сооружений, эксплуатации месторождений, содержанию транспортных систем, ведению сельского хозяйства, обеспечению жизни и здоровья населения Арктики и Субарктики.

## Пространственно-временна́я изменчивость вечной мерзлоты в России

В Российской Федерации многолетняя криолитозона занимает 2/3 территории градуса [26]. Это северные и северо-восточные регионы России, в пределах которых приповерхностная часть земной коры частично или полностью представлена отрицательно температурными горными породами, содержащими ледяные включения. В большинстве своем – это мало освоенные регионы с суровыми природными условиями. Экономика этих регионов связана в основном либо с традиционной жизнедеятельностью, либо с разработкой месторождений полезных ископаемых. Обычно геокриологический фактор осложняет хозяйственную деятельность, но иногда мерзлота выступает как благоприятный фактор, слагая надежные основания, образуя водоупоры и снижая миграционную активность загрязняющих веществ.

Основными характеристиками ММП являются мощность, сплошность распространения, температура, льдистость, литологические и теплофизические свойства грунтов, экзогенные геологические процессы. Засоленность пород часто определяет состояние пород при отрицательных температурах и образование в них т.н. криопэгов.

Зона сплошной мерзлоты наиболее обширна (рис.2). На равнинах Европейском севера России она протягивается полосой шириною 100…200 км вдоль морского побережья. В Западно-Сибирской низменности ее южная граница примерно совпадает с полярным кругом, в Восточной Сибири и Якутии она опускается до широты Байкала.

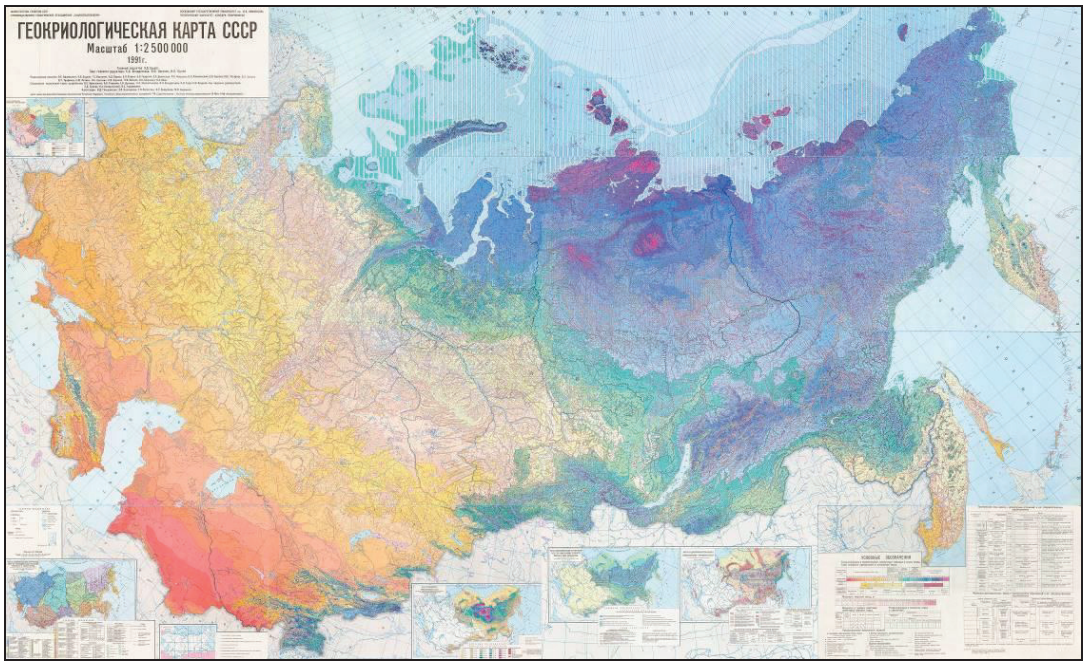



*Рис.2. Образ Геокриологической карты СССР масштаба 1:2 500 000. / Под ред. В.А.Кудрявцева и Э.Д.Ершова. – М., 1991 (распространение мерзлоты: сплошное – синие и фиолетовые тона, прерывистое и островное – зелёные, редкоостровное – бледно-жёлтые тона, области сезонной мерзлоты – остальные цвета)*

Зона прерывистой мерзлоты на Европейском севере протягивается узкой полосой, расширяется в Западной Сибири до нескольких сотен километров. Восточнее прерывистая мерзлота приурочена в основном к межгорным впадинам и приморским равнинам южнее 60-й параллели.

Островная и редкоостровная мерзлота распространена до широты полярного

круга в Европе, до 60-й параллели в Западной Сибири. В более восточных районах зона ее распространения опускается до южной границы РФ.

Особым образованием является так называемые реликтовые многолетнемерзлые породы, залегающие на глубине от десятков до сотен метров ниже поверхности земли, или отделенные горизонтами талых (межмерзлотных) пород от вышележащей поверхностной современной мерзлоты.

Общие закономерности распределения температур пород изменениями температуры атмосферы и нарушаются региональными, секторальными и ландшафтными местными условиями, а также характером трендов обеих температуры во времени (рис.3).

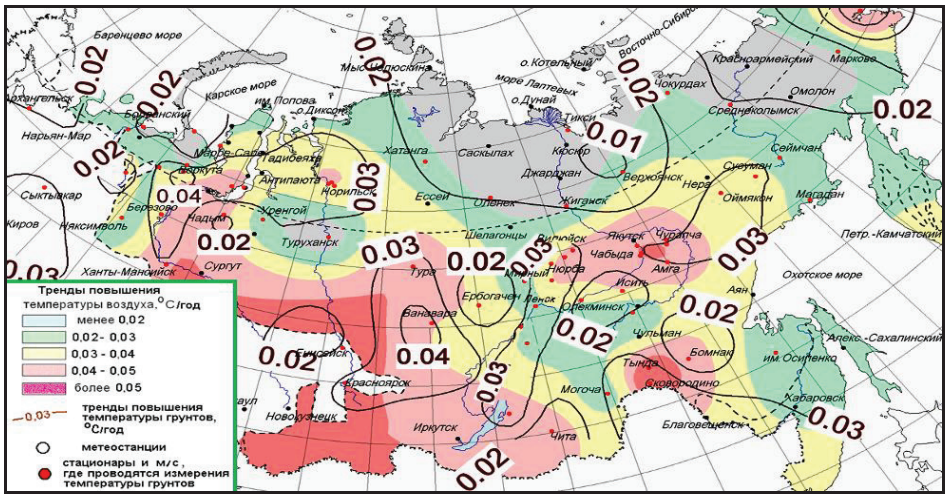



*Рис.3. Тренды изменения среднегодовой температуры воздуха (цвет) и грунтов на глубине 10-15 м (изолинии) за последние 40-50 лет [13]*

В этом отношении показательным оказалось сопоставление многолетних режимных наблюдений в одинаковых природно-климатических условиях в сходных ландшафтах и морфологических условиях (полого-волнистые равнины в южной тундре) на Европейском севере России и в Западной Сибири. В обоих регионах за прошедшие 30-40 лет наблюдается потепление мерзлоты, однако абсолютные значения и самих температур и их градиентов отличаются в 2-2,5 раза. Лишь для азональных отепляющих условий (зимнее скопление снега) результаты оказались идентичны (рис.4).

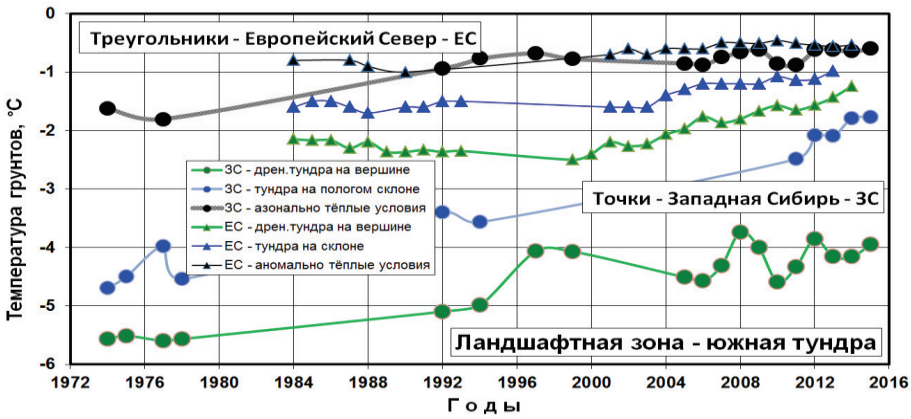



*Рис.4. Повышение температуры ММП в разных ландшафтных условиях южной тундры на Европейском севере и в Западной Сибири*

По соотношению времени промерзания пород со временем накопления минеральной и биогенной составляющих ММТ разделяются на сингенетические и эпигенетические. В большинстве своем мерзлые толщи имеют эпигенетическое (или

эпикриогенное) происхождение, т.е в эпоху похолодания промерзали ранее накопившиеся отложения. Содержание льда в этих породах примерно соответствует тому количеству воды, которое содержалось в них до промерзания. Иногда создаются условия для приноса дополнительной влаги к фронту промерзания. В этом случае в промерзающей толще образуются пласты льда толщиной от десятков сантиметров до десятков метров (рис.5). Не всегда имеются надёжные геологические и ландшафтные признаки наличия пластовых льдов в толще мерзлоты, и очевидными они становятся будучи так или иначе затронуты процессами разрушения [21] – будь то природные процессы деградации мерзлоты, или техногенез.

А

Б

*Рис.5. Пластовые льды: А – пласт льда мощностью несколько метров практически непосредственно под грунтами деятельного слоя; Б – образование термоцирка на месте вытаивающего пластового льда*

Сингенетические (синкриогенные) мерзлые толщи промерзали одновременно с накоплением минеральных и/или биогенных пород. К ним относятся верхнеплейстоценовые и голоценовые пылеватые и глинистые отложения приречных и приморских равнин, а также шельфа (например, в Якутии), эолово-элювиально-делювиальных склонов горных массивов, котловин крупных озер. Количество влаги в этих грунтах, промерзающих при накоплении, –не ограничено. Лед насыщает породы и образует повторно-жильные льды, суммарный объем которых может достигать 80% и

более (рис.6).

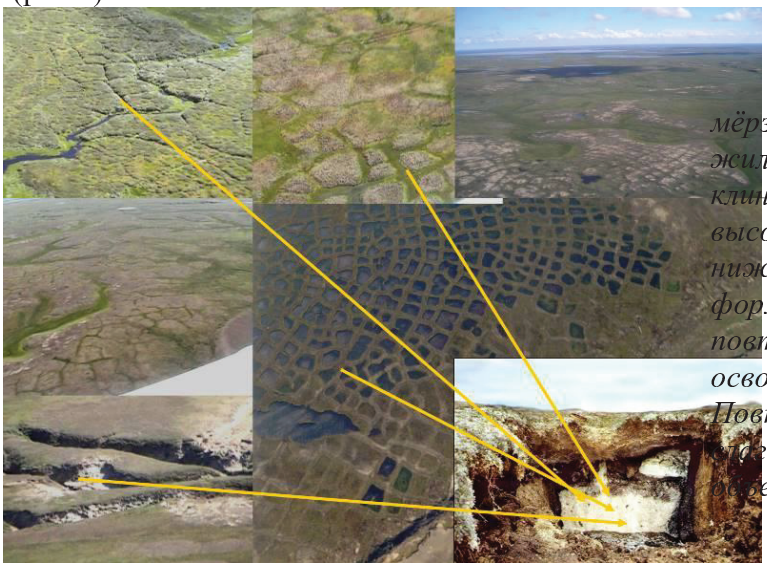


*Рис.6. Сингенетически мёрзлые породы. Повторно-жильные льды: верхняя часть клина льда шириной ~3 м и высотой ~8-10 м (врезка в правом нижнем углу); многочисленные формы полигонального рельефа по повторно-жильным льдам, в т.ч. освоенные эрозией и термоэрозией. Повторно-жильные льды не редко образуют т.н. "ледовый комплекс" с объемной льдистостью 50-80%.*

**Криогенные геологические процессы и инженерные проблемы**

С мерзлыми породами связан сложный комплекс процессов. Техногенное воздействие, как правило, резко ускоряет деструктивные экзогенные геологические процессы, доводя их до катастрофической активности, особенно, если происходит деградация сильнольдистых мерзлых пород.

Развитие учения о геосистемах показало, с одной стороны, высокую чувствительность криолитозоны к изменению теплового поля и большую по сравнению с другими геологическими объектами динамичность состояния, а с другой – возможность типизации условий (и, соответственно, экстраполяции данных) [3, 8] по ярким внешним физиономическим признакам, сформированным этой динамикой. Теоретические построения о закономерностях трансформации криосферы и многолетний мониторинг ее изменчивости повлекли за собой обновление подходов и нормативной базы проектно-изыскательных работ. Однако достигнутый теоретический и методический уровень используется не везде и не всегда, за что природа расплачивается "бедлэндами", а экономика – авариями и затратами. Аномально теплыми оказались 2007-08 и 2012-14 годы, и геокриологический мониторинг показал, как на это прореагировала вечная мерзлота и ландшафты в целом [2, 19, 16]:

- увеличилась пучинистость грунтов;
- активизировались процессы термокарста и термоденудации; увеличилось количество криогенных оползней и интенсифицировалась солифлюкция;
- увеличились темпы термоэрозии и оврагообразования;
- в лесотундровых ландшафтах повсеместно наблюдается опускание кровли мерзлоты и формирование обширных надмерзлотных таликов, принципиально изменяющих тепло- и влагообмен, гидрогеологические условия, несущую способность грунтов;
- увеличились площади выгорания бореальных лесов;
- разрушаются льдистые берега (скорость отступания берега до 15 м/год вместо обычных 0,5-2 м/год);
- активизировалось криогенное растрескивание и усилился рост повторно-жильных льдов.

*Рис.7. Термокарст (А) и термоэрозия (Б) вдоль трубопровода*

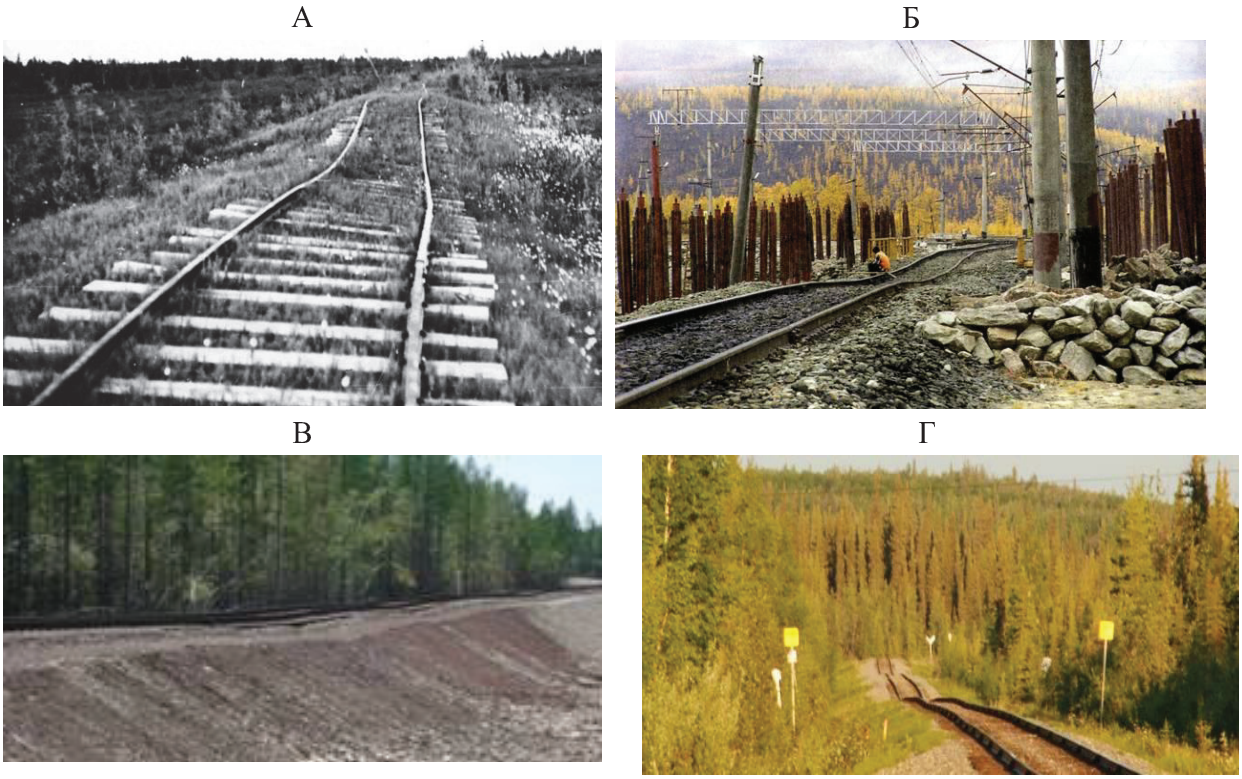



*Рис.8. Деформации железных дорог на участках полигонально-жильных льдов: А – «сталинская дорога" – стройка 501; Б – Транссиб; В – ж/д Беркакит-Якутск на мощном идеальном щебнистом балласте; Г – ж/д на Аляске [архивы НКВД; 6]*

Эти естественные процессы на огромных территориях усиливаются хозяйственной деятельностью человека, особенно при строительстве линейных сооружений большой протяженности [15]. Растет аварийность геотехнических систем. Это выпучивание, осадки, деформации сооружений и объектов. Вдоль магистральных газопроводов происходит заболачивание и как следствие – всплывание магистральных газопроводов, а на перегибах рельефа – активная эрозия (рис.7).

Это связано с недостатками при изысканиях, устаревшими стандартами, нарушением режима эксплуатации. Серьезной проблемой транспорта газа является возможность гидратообразования в трубопроводах. Экономические потери исчисляются десятками млрд. рублей в год, потраченных на восстановление положения

газопроводов. Серьезные проблемы возникают при строительстве железных и автомобильных дорог. Деформации линейных объектов, пересекающих ландшафты, сформировавшиеся на разной литогенной и криогенной основе, иллюстрируют процессы деградации мерзлоты в зависимости от природных условий (рис.8).

В советское время Норильск был образцом свайного строительства на вечной мерзлоте, однако прекратила работу мерзлотная служба, нарушаются правила эксплуатации, и массовыми стали аварийные деформации промышленных и гражданских зданий и сооружений (рис.9). Аналогичная картина наблюдается и в других северных городах – Воркуте, Якутске, Анадыре.

*Рис.9. Аварии гражданских зданий. Норильск, на переднем плане деформированный криогенными процессами фундамент разобранного 5-этажного панельного здания, 2006 г. (фото Д.С.Дроздова)*

При этом технологии безопасного хозяйствования давно разработаны и активно совершенствуются. С конца 40-х годов XX века активно стали использоваться термостабилизатовы для охлаждения оснований зданий, резервуаров, трубопроводов, насыпей дорог и плотин. При необходимости добавляется принудительное охлаждение [4]. Для снижения негативного влияния многолетнего и сезонного промерзания грунтов на образование пучин на дорогах внедряется использование в дорожных конструкциях теплоизоляционного и дренирующего слоя из пеностекла, причём в отличие от зарубежных аналогов получаемого из дешёвого природного кремниевого сырья - диатомита [27].

## Актуализация «Геокриологической карты Российской Федерации» и повышение эффективности проектирования и изысканий

Геокриологическая карта на территорию бывшего СССР в масштабе 1:2 500 000 была составлена на геологическом факультете Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова под редакцией проф. В.А.Кудрявцева. Большой фактический материал, а также ряд обзорных специальных и общих карт, проанализированные на высоком теоретическом уровне, позволили впервые составить карту такой информативности на всю территорию СССР в масштабе 1:2 500 000. Научное и практическое значение геокриологической карты определяется следующими обстоятельствами:

геокриологическая карта охватывает большую территорию, криолитозона (область распространения многолетнемерзлых пород) на которой занимает занимает

65% площади России;

для больших, сложных в природном отношении, территорий карта является основной формой обобщения фактического геокриологического материала, а также изучения и понимания природно-территориальных ресурсов страны;

для малоизученных территорий карта является единственной возможностью предварительной оценки геокриологических условий и целенаправленной постановки задач при проведении мелко и среднемасштабных исследований перспективных для использования территорий;

комплексная геокриологическая карта большой детальности необходима как основа для экологической оценки территории страны, мониторинга ее природных условий, разработки инженерно-геокриологических прогнозов и природоохранных мероприятий при освоении природных ресурсов.

Основной фактический материал по строению криолитозоны получен по районам проведения крупно-, средне- и мелкомасштабных комплексных геокриологических, инженерно-геокриологических и гидрогеокриологических съемок, по которым составлено множество различных тематических карт масштаба 1:1 500 000 и крупнее. Кроме того, фактическими данными, послужившими опорным материалом при составлении карты являлись: климатические данные гидрометеорологических справочников, описания колонок, термометрия и комплексный каротаж по глубоким и картировочным скважинам, шахтам, шурфам, геофизические данные по профилям и площади (ВЭЗ и электропрофилирование); описания ландшафтных условий, описания и зарисовки обнажений, элементов рельефа и материалы опробования слагающих их отложений, криогенных процессов и явлений (современных и реликтовых); данные радиотеплового метода наземного и аэрозондирования; материалы лабораторных определений состава и свойств пород и льда, пыльцевого и диатомового анализов, абсолютного возраста отложений и др. Неравномерность изучения геокриологических условий по территории обусловлена тем, что большинство данных сконцентрировано на отдельных небольших по площади опорных участках, называемых "ключевыми". Установленные на ключевых участках и ключевых районах закономерности формирования геокриологической обстановки и конкретные характеристики распространялись на сходные по мерзлотообразующим факторам территории на основе ландшафтного метода. Тесная взаимосвязь геокриологических условий от геологической и ландшафтно-климатической среды выражается через соответствие с ними мерзлотных характеристик.

Карта, составленная в 80-х гг. XX в., явилась важнейшим достижением региональной геокриологии и геокриологического картографирования того времени. В настоящее время она широко используется для подготовки специалистов-геокриологов, в образовательных и научных целях, а также проектно-изыскательскими организациями на стадии обоснования инвестиций. Она представляет собой карту мерзлотных условий и отражает широкий комплекс характеристик: геологическое строение, распространение и среднегодовые температуры пород, мощность и строение криолитозоны, криогенные образования. Трудность прочтения большинства элементов ее содержания, за исключением основного - температуры пород, обусловленная информативностью карты, а также детальностью картографирования – практически непреодолимое негативное свойство карт условий, представленных в бумажной версии. Этого свойства лишены являющиеся многослойными электронные карты. К настоящему времени уже составлен ряд геологических электронных карт России масштаба 1:2 500 000: геологическая, гидрогеологическая, инженерно-геологическая. Геокриологическая карта СССР составлена по материалам, полученным 30-50 лет назад. За время, прошедшее с момента ее создания, получены новые данные, особенно

многочисленные и важные на арктическом шельфе. В этот период значительно изменился ряд геологических представлений, существенные успехи были достигнуты в теории, методологии и методике геокриологических исследований. Вслед за успехами в развитии вычислительной техники существенное развитие получили расчетные методы в геокриологии. Сказанное свидетельствует, что карта, составленная в1980-е гг., требует приведения ее в соответствие с современными теоретическими основами и фактическими данными. Очевидно, что этот процесс должен осуществляться на основе применения новых технологий.

Кафедра геокриологии МГУ, Институт криосферы Земли и Институт мерзлотоведения им. П.И.Мельникова начали работу по переводу Геокриологической карты СССР масштаба 1:2 500 000 в электронный вид, обновлению и расширению ее содержания. Конечной целью этой работы будет карта, содержание которой можно наращивать и изменять по мере поступления новых данных и развития науки. Поэтому число слоев предполагается сделать больше, чем число элементов содержания существующей карты. В частности, рассматривается возможность дополнения карты слоем районирования (помимо геологической основы, геокриологических характеристик, криогенных процессов и явлений), т.е. слоем природных факторов, определяющих формирование и пространственное распределение мерзлотных условий, а также слоем космических изображений. В последнее время для криолитозоны в целом, а особенно для ряда районов значительную остроту приобрели вопросы глобального изменения климата и экологического состояния природной среды криолитозоны. Прорабатывается возможность отражения на карте последствий изменения климата и различных видов хозяйственной деятельности. В целом, хотя возможности проектирования, изысканий и высокотехнологического строительства в целом в последнее время выросли, используются они далеко не всегда эффективно. Одна из причин – это принятие неоптимальных генеральных предпроектных решений, закладывающих всю логику последующих действий. Одна из причин неоптимальности – отсутствие актуализированной версии «Геокриологической карты Российской Федерации».

Геокриологическая карта России должна быть реализована в виде электронной (компьютерной) карты-модели с соответствующими базами данных. Хорошо изученные площади на территории страны (районы крупных экономических комплексов и агломераций) являют собой своеобразные «ключевые участки» (масштаб 1:1 000 000…1:500 000 и при необходимости крупнее). Статистические критерии должны позволить количественно оценить правомочность переноса данных с заданной доверительной вероятностью. Первоначальные этапы актуализации включают: 1) цифровой вариант «Геокриологической карты СССР», с корректировкой технических ошибок и очевидных несоответствий; 2) непротиворечивую трансформацию "старой" карты на выбранную топооснову; 3) корректировку содержания контуров карты.

В настоящее время для территории РФ имеется широкий набор карт (цифровых и на твердых носителях) топографического, географического, геологического, социально-экономического и др. характера. Степень обновлённости, содержащейся на них информации различна. Предположительно, некоторые границы для новой карты будут импортированы с этих карт с учётом их достоверности и значимости для геокриологических условий. В первую очередь должна быть учтена новая «Геологическая карта России масштаба 1:1 000 000».

## Стационарные наблюдения

Среди многочисленных геокриологических проблем в Арктике выделяются те, решение которых требует проведения длительных стационарных исследований. Среди таких проблем находится, в частности, вопрос о восстановлении нарушенного почвенно-растительного покрова тундры, проведении очистных мероприятий на загрязненных нефтепродуктами и другими вредными веществами территориях, возможностях переноса и накопления загрязнителей в геологической среде, прогноз вероятного потепления климата и активизации опасных геологических процессов и другие. Специализированные стационарные исследования целесообразно проводить в составе комплексного мониторинга природной среды. Как известно, понятие мониторинга окружающей среды было введено Р. Мэнноном в 1972 г. на Стокгольмской конференции ООН. Сегодня центральной задачей становится продолжение существовавших ранее сетей наблюдений. Институт криосферы Земли, Институт геоэкологии и ВСЕГИНГЕО проводили такие исследования в Западной и Восточной Сибири и имеет стационары в районе метеостанции Маресале, оз. Паринсето (материковая часть Гыдана), в окрестностях Надыма и других районах. На этих площадках изучались или продолжают изучаться динамика промерзания-протаивания, температурный режим грунтов до глубины 10-15 м, в том числе вокруг линейных сооружений, пучение, осадки и термокарст, морозобойное растрескивание и другие процессы, а также велись наблюдения за восстановлением нарушенных естественных условий. Подобные же исследования в были организованы на севере Иркутской области, в Верхнеангарской и Чарской впадинах и других районах. Там были оборудованы площадки в естественных и нарушенных условиях по изучению терпературного режима грунтов и их влажности, промерзания и протаивания, пучения, солифлюкции и курумов, овражной термоэрозии и других. Аналогичные площадки были на территории большеземельской тундры, на мысе Болванском и в районе метеостанции Шапкино, на севере Якутии (район Куларе, метеостанция Юбилейная, мыс Святой Нос). Значительный опыт проведения стационарных наблюдений имеется в Институте мерзлотоведения им.П.И.Мельникова СО АН СССР, где руководил этими работами П.И.Мельников, А.В. Павлов, М.Н.Железняк и другие. Там были выполнены уникальные исследования, позволившие изучить закономерности изменения составляющих теплового баланса на границе атмосферы и литосферы. К сожалению, фундаментального обобщения всех этих работ на единой основе до сих пор не выполнено, нет уверенности в сохранности материалов наблюдений, продолжение работ, несмотря на их важность, особенно ввиду возможных глобальных изменений климата, крайне проблематично.

При постановке стационарных исследований следует иметь в виду главную цель этих исследований – создание необходимой эмпирической базы мерзлотоведения, а также решение практических задач. Вместе с тем остаются слабо неизученными принципиальные вопросы единой методики измерений, репрезентативности стационаров и экстраполяции результатов наблюдений. Одним из первых приходится решать вопрос о периодичности и продолжительности наблюдений. Частота наблюдений, как правило, определяется частотой изменения характеристик самих процессов. Хотя продолжительность наблюдений также определяется продолжительностью процесса, однако при этом важно изменение его характера во времени. Распространенным недостатком давно стало прекращение исследований, короткая жизнь стационаров и связанное с ней полное отсутствие длинных, для десятков лет рядов наблюдений.

Поскольку необходимой составляющей стационарных наблюдений является изучение температур грунтов, они должны быть круглогодичными. Только в этом случае можно оценивать их динамику температурного режима - при изменении условий на поверхности новый режим промерзания-протаивания устанавливается в течении примерно пяти лет. Изменения же температуры в многолетнемерзлой толще происходят еще медленнее, и на глубине нулевых годовых амплитуд они проявляются через 10-15 лет.

Современный уровень техники предполагает проведение наблюдений с применением дистанционных и автоматических методов измерений характеристик. Необходимо создание соответствующих серийных и сертифицированных приборов для изучения температурного режима и промерзания-протаивания, свойств снежного и поверхностных покровов; приборов для изучения физико-механических свойств грунтов, измерительно-вычислительных комплексов для сбора, хранения и обработки информации.

В организации и создании сети стационаров по изучению изменений геокриологических условий имеются и другие трудности. Геологические и изыскательские организации все еще не имеют достаточного опыта их проведения - соответствующие специалисты, как правило, отсутствуют. Несмотря на опубликованные рекомендации, нормативные документы на мониторинг отсутствуют, нет необходимых серийно выпускаемых технических средств.

Таким образом, в связи с тем, что проблемы восстановления естественных условий, миграции и накопления загрязнений ранее были изучены недостаточно, но могут быть решены только посредством длительных стационарных исследований, именно последним должен принадлежать приоритет. В нашей стране имеется несколько районов, перспективных для хозяйственного использования в ближайшие годы, к числу которых принадлежат п-в Ямал, Воркута, Таймырский полуостров с Норильским промышленным узлом, Якутия, Чукотка и другие, где такие исследования проводились или проводятся. Сегодня необходимо их возобновление, поддержание и координация. Важным и своевременным шагом является обязательность наблюдений за вновь возводимыми зданиями и сооружениями на вечной мерзлоте, предполагаемая новым СНиПом «Основания зданий и сооружений на вечномерзлых грунтах»

## Экспериментальные исследования мерзлых грунтов

Обеспечение надежной устойчивости сооружений в криолитозоне обусловлено достоверностью характеристик прочности и деформации грунтов. Накопленными до настоящего времени данными установлено четкое проявление реологических свойств мерзлых грунтов: снижение прочности и развитие деформации во времени, разработаны параметрические уравнения, позволяющие прогнозировать несущую способность оснований сооружений на период их эксплуатации. Однако уровень состояния исследований и их внедрения в практику строительства по многим проблемам не отвечает современным требованиям высоких технологий и темпов освоения природных ресурсов в регионах криолитозоны. Усовершенствование методов оценки формирования напряженно-деформированного состояния оттаивающих грунтов предполагается выполнить комплексно, сочетая полевые и лабораторные испытания, теоретические разработки. Современные исследования образцов в основном развиваются в плане совершенствования автоматизации измерений, позволяющих проводить одновременно большое количество испытаний. В этом плане достигнуты некоторые успехи, позволяющие лабораториям проводить испытания десятков и в некоторых случаях сотен образцов в относительно короткие сроки, обычно требуемые

при проведении инженерно-геологических изысканий. При этом не наблюдается значительных усовершенствований самого оборудования для испытаний, более того, наблюдается естественная тенденция применения экспресс-методов, т.е. упрощение методик.

Вместе с тем развитие методов прогноза устойчивости инженерных сооружений, а также прогноза развития криогенных процессов и проектирование сложных и ответственных сооружений в Арктике требуют применения универсальных и информативных методов испытаний – таких, как трехосные испытания. За рубежом они достаточно давно получили развитие, некоторые компании выпускают современные автоматизированные трехосные установки, специально спроектированные для работы с мерзлыми грунтами. В России, несмотря на то, что экспериментальное оборудование для трехосных испытаний мерзлых грунтов появилось достаточно давно, фактически оно не получило широкого распространения. В практике изысканий до сих пор преобладают определения физических характеристик мерзлых грунтов, а для расчетов устойчивости инженерных сооружений используются рекомендуемые приложения к нормативным документам, что в некоторых случаях приводит к серьезным деформациям инженерных сооружений в криолитозоне. Редко проводятся, например, свайные испытания, позволяющие определить несущую способность фундаментов с большей достоверностью. В практике инженерных изысканий нередко допускаются нарушения при отборе и хранении образов, в том числе связанные, например, с отсутствием необходимого оборудования и материалов. Практически не проводится контроль целостности образцов, что приводит к неточным результатам, а также контроль потери влажности (льдистости).

## Новые направления криосферных исследований

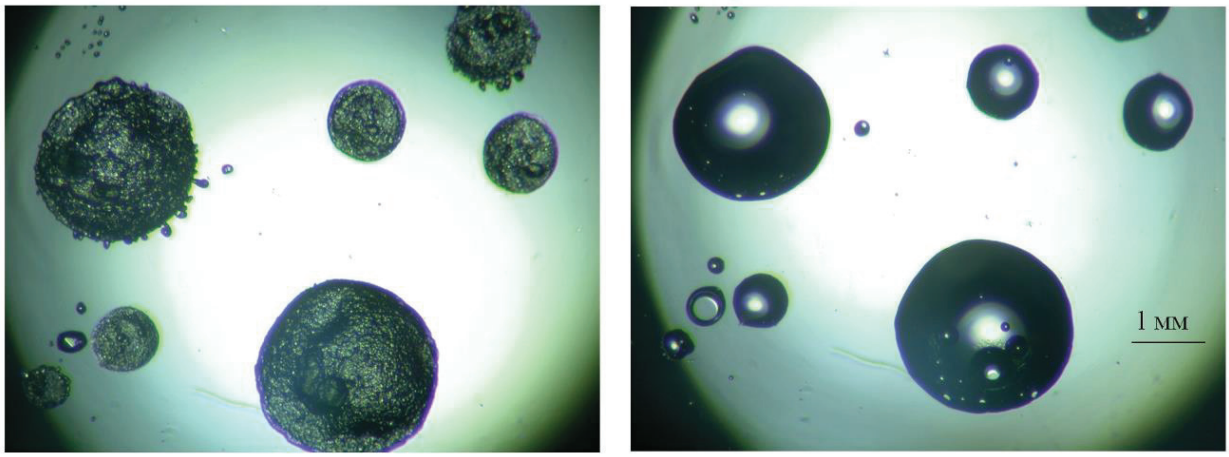
Специальные междисциплинарные исследования проводятся, чтобы найти нетрадиционные природные ресурсы в "мире холода" [1,12], и свести к минимуму риски, вызванные неустойчивостью вечной мерзлоты и ее уязвимости по отношению к изменениям климата и техногенным нагрузкам.

### *Газовые гидраты*

Газовые гидраты сырьем будущего. Накопленные сведения о кинетике гидратообразовании и их распространение позволяют утверждать, что газа в газогидратах минимум столько же сколько и свободного природного газа, но скорей всего в 1,5-2,0 раза больше [25]. На континентах газогидраты распространены и выше зоны их термодинамической стабильности – в толще мерзлых пород. Это так называемые реликтовые газогидраты, сохранившиеся благодаря эффекту самоконсервации. К настоящему времени газовые гидраты найдены вокруг всех континентов Земли, с содержанием в них газа в количестве, сопоставимым с доказанными запасами традиционного природного газа. Исследования, выполненные в Институте криосферы Земли СО РАН [26, 28], достоверно показали, что при отрицательных температурах (т.е. в мерзлоте) диссоциация газовых гидратов может протекать через промежуточную стадию образования переохлажденной воды, которая затем переходит в лед (рис. 11).

В последнее время газовые гидраты в ММТ рассматриваются в рамках идеи захоронения избыточного количества диоксида углерода ($CO_2$) – сильного парникового газа, в мерзлых и подмерзлотных горизонтах в форме гидратов $CO_2$. В связи с этим в ИКЗ СО РАН выполнены специальные исследования [26, 28], впервые давшие

экспериментальные сведения о диаграмме состояний в трёхфазной системе: лед – раствор $CO_2$ в воде – газ в интервале температур от 0 °С до -3°С и давления от 0 до 20 атмосфер. Полученные данные указывают, что наличие свободного $CO_2$ или насыщенного водного раствора $CO_2$ на глубине 100 м вызовет плавление подземного льда и деградацию мерзлых пород, если их температура не ниже –1,5°С. И даже если само по себе это окажется неопасным, исчезнет ледяная рубашка, предотвращающая диссоциацию реликтовых метано-гидратов. Тем самым ставится вопрос о недопустимости захоронения $CO_2$ в мерзлоте, хотя как средство повышения отдачи метана углекислота используется.




0 мин 31 мин

*Рис. 11. Диссоциация гидратов метана и образование переохлажденной воды при -5°С и 16 атм (равновесное давление диссоциации при данной температуре равно 22 атм)*

### *Газо- и гидродинамика в мерзлоте*

Развитие исследований различного вида газопроявлений в криолитозоне чрезвычайно важно для установления картины динамики процессов в мерзлых породах и многочисленных видах льда трещинной, клиновидной, диапировой и пластовой формы в сложных залежах. Формирование некоторых ледовых залежей сложной формы, образованных инъекциями воды, обусловлено цикличностью и стадийностью образования, развития, промерзания и разнообразием таликов [17]. На направление движения инъекций водно-газовых растворов указывают спиральная ориентировка газовых пузырьков в прослоях льда.

Микроскопические исследования шлиров диатомовых глин в основании бугра пучения на юге Тазовского полуострова позволили обнаружить в них полые ледяные образования размером 0,1-0,5 мм сферической, футляровидной и вытянутой формы. Кристаллическая гексагональная структура оболочек льда подчеркнута границами кристаллов и фигурами травления граней (рис. 12). Остаточная концентрация метана во льду в три с лишним раза превышала грунтовую. Полые кривогранные образования микронной размерности названы нами кристаллитами льда [7, 29]. Подобные искаженные полые кристаллы других минералов, наполненные газом, встречаются в гидротермальных жилах при высокой температуре.

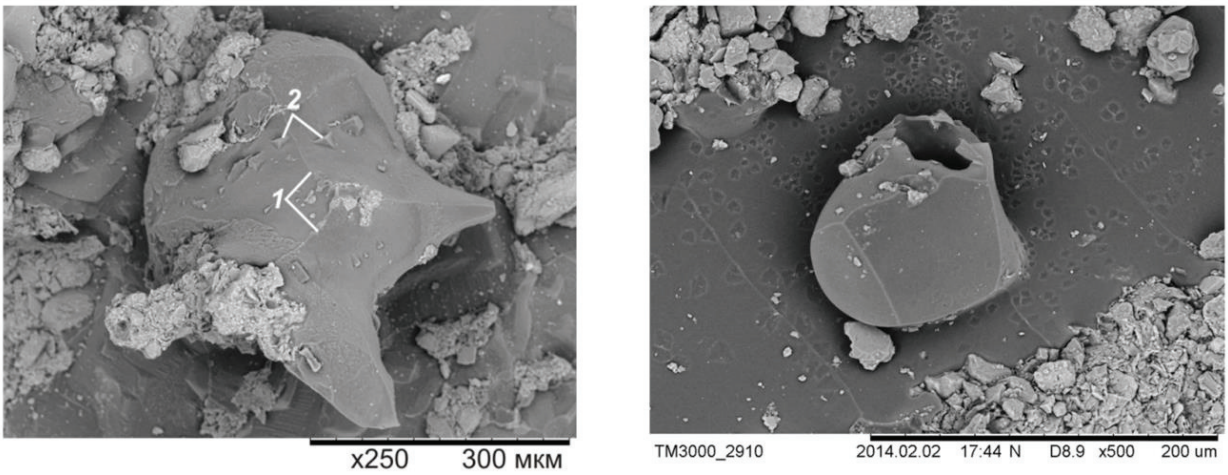



*Рис. 12. Газосодержащие кристаллиты льда в диатомовых глинах, Тазовский п-ов. 1 – границы кристаллов; 2 – формы травления льда*

И еще одно явление, обязанное термо-газо-гидродинамике, вызвало широкий интерес. Речь идет о воронке до 30-40 м в диаметре и почти вдвое больше по глубине, образовавшейся на п-ове Ямал. Предварительные исследования показали, что возможно в результате климатических аномалий 2012-2014 гг. и предшествующего им теплого цикла был запущен механизм изменения поверхностных условий и последующего выброса льда, грунта и газа на расстояние до 120 м от центра воронки. Ранее, в 1990-х годах, подобные явления были обнаружены на шельфе Печорского и Баренцева морей.

### *Капельные кластеры*

Открытие в 2004 году капельного кластера [23] – плоской пространственно упорядоченной структуры из капель воды (рис. 13), возникающей над подогретой водной поверхностью, положило начало развитию новой области исследований о пространственно упорядоченных аэрозолях. Нами было показано, что упорядоченные трехмерные капельные структуры могут существовать также в атмосферном тумане и облаках. Полученная в эксперименте большая вязкость тумана, в сотни раз превышающая вязкость чистого воздуха, позволила сделать вывод о возможном значительном влиянии упорядоченного капельного аэрозоля в атмосфере на процессы конвекции и тепломассоперенос. Криогенные процессы в атмосфере, такие как замерзание воды в аэрозоле при температурах ниже 0°С, способствуют снижению электропроводности атмосферы, увеличению межкапельного расстояния, росту плавучести аэрозоля и образованию мощных грозовых облаков. Установление важной роли криогенных процессов в атмосфере, их влияния на климат Земли – цель наших дальнейших исследований [5, 21, 30].

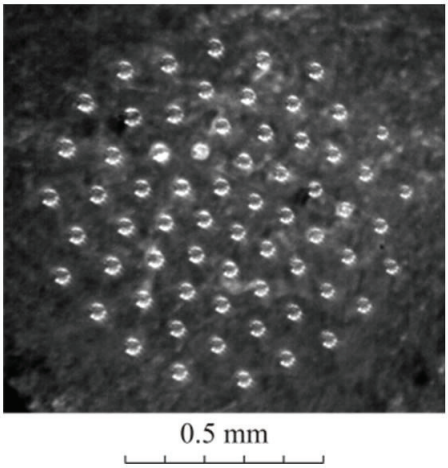



*Рис. 13. Двумерный капельный кластер над поверхностью подогретой воды*

***Микробиота в криолитозоне***

Мерзлая часть литосферы традиционно считалась областью биогеохимического покоя, хотя сведения о наличии в мерзлоте живых бактерий появились в России в конце XIX века в связи с находками мамонтов на севере Сибири и изучением почв на Дальнем Востоке. Микрофлора впервые была найдена в Антарктической вечной мерзлоте в 70-х годах [24]. В 1979 году на Антарктической станции Восток обнаружены бактерии, грибы, диатомеи и другие микроорганизмы. Метаболизм бактерий в вечной мерзлоте был отмечен при температурах около -20°С [24].

Результаты наших исследований в Якутии [22, 29] свидетельствуют, что выявляемые здесь сообщества психрофильных микроорганизмов выживают или сохраняются в чрезвычайно экстремальных условиях. Деятельность почвенных микроорганизмов криолитозоны изучена недостаточно, до сих пор нет целостной картины количественного и качественного состава микрофлоры почв мерзлотных ландшафтов, не ясны механизмы устойчивого развития микробных сообществ при отрицательных температурах. Выделенные из мерзлоты микроорганизмы обладают неизвестной стратегией сохранения жизнеспособности и легко вовлекаются в современные биогеохимические процессы при оттаивании пород. К настоящему времени российскими микробиологами и их коллегами из Швеции, Канады, Японии выполнено секвенирование полных геномов четырех штаммов бактерий из многолетнемерзлых отложений, показаны отличия их генеалогических связей от генетически близких организмов. Исследования на растениях показали перспективность использования отдельных штаммов микроорганизмов из мерзлоты для улучшения всхожести, повышения хладостойкости и продуктивности зернобобовых растений. Опыты на лабораторных животных показали иммуномодулирующее, репаративное и геропротекторное воздействие.

Для штамма Bacillus F [22], выделенного из мерзлых отложений Мамонтовой горы в Якутии (рис. 14), установлено дозозависимое усиление метаболизма макрофагов, снижение фактора некроза опухолей, стимулирующее влияние на активность клеточного и гуморального иммунитета, фагоцитарную активность макрофагов. Выявлено также улучшение широкого спектра физиологических показателей. Не исключено, что микроорганизмы криолитозоны имеют специальные механизмы репарации клеточных структур, необходимые для выживания в экстремальных условиях. Дальнейшие исследования по раскрытию механизмов сохранения жизнеспособности должны приблизить нас к решению проблемы увеличения продолжительности жизни.

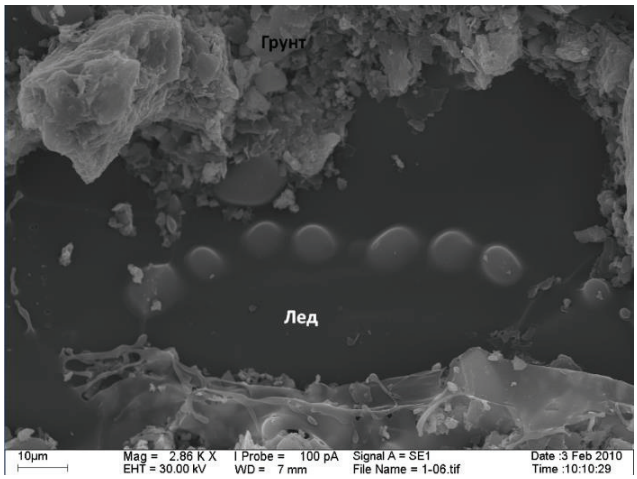



*Рис. 14. Клетки в льду ледового комплекса Мамонтовой горы, Якутия. Фото В.В.Рогова*

### *Засоленные мерзлые породы*

Засоленные многолетнемерзлые породы широко распространены на побережье Северного Ледовитого океана, а также в некоторых других регионах (например, в Центральной Якутии). Засоленные мерзлые грунты имеют особые свойства, характеризуются низкой несущей способностью и представляют собой объект исследования, занимающий положение между мерзлыми и немерзлыми грунтами. Они замерзают при более низких температурах, содержат больше незамерзшей воды, чем обычные мерзлые грунты, что вместе с другими особенностями их состава и строения определяет их своеобразие и отличие от незасоленных мерзлых грунтов по физическим характеристикам, деформируемости, прочности и другим свойствам. Исследования по настоящей проблеме целесообразно продолжить в области крупномасштабного картирования засоленных мерзлых грунтов и исследований их генетических типов, разработки эффективных методов исследования, физических и математических моделей их деформирования и разрушения, исследования химических реакций, критериев влаго- и солепереноса и процессов изменения их состава и строения.

### Моделирование тепловых процессов

Основной проблемой традиционного мерзлотоведения является тепловое состояние и эволюция вечной мерзлоты. Однако сбор данных по ее температурам не всегда сопровождается моделированием, недостаточно проводит их анализ и обобщение, особенно на региональном и, что сегодня особенно актуально, на глобальном уровне. Математическое моделирование тепловых процессов в стране развивается недостаточно, за исключением может быть новых разработок кафедры геокриологии МГУ – программ «Tundra», «Frost» и другие. Численными методами прогноза температурного режима грунтов многие организации, несмотря на очевидные потребности северного строительства и индустрии, к сожалению, занимаются мало, в том числе проектировщики. Исследование криогенных процессов носит преимущественно описательный характер, а их количественный прогноз основывается на разработках тридцатилетней давности. Практически не совершенствуются методы предупреждения опасных процессов.

### Оснащение, практические разработки и подготовка кадров

В геокриологии в целом недостаточно используются новые методы и подходы к решению научных задач. Уровень технической оснащенности значительно отстает от

мирового уровня, что определяет не очень высокие качество и объемы полученных результатов, а также содержание научных публикаций. К сожалению, мало используются методы и технологии, которые интенсивно в последнее время развиваются в смежных науках – физике, химии, биологии, - по-видимому, из-за отсутствия современной технической базы и снабжения. К сожалению, большая часть геокриологов участвует и не нацелена на разработки по созданию новых продуктов для народного хозяйства, за исключением решения частных проблем, преимущественно, на конкретных строительных площадках. Проблемы научного обеспечения строительного комплекса рассматриваются в нашей науке лишь в той мере, в которой они затрагиваются в технических заданиях хозяйственных договоров. Экономичные и надежные основания из новых материалов и на новых принципах, а также количественный прогноз свойств мерзлого грунта, как перспективные направления исследований, в целом развиваются, но пока на стадии научных разработок. Проблемы Арктического шельфа в связи с возможной разработкой на нем полезных ископаемых рассматриваются в целом недостаточно, несмотря на отдельные фундаментальные работы, например, Института мерзлотоведения им. П.И.Мельникова по морю Лаптевых.

Наша организационная работа в целом требует улучшения, в частности, в плане координации деятельности институтов, кафедр, лабораторий и их научных тематик. Связи с общественностью остаются слабыми. Нашей деятельности требуется более широкое освещение, в частности, на телевидении, в журналах и газетах. Связи с вузами и школами нуждаются в значительном улучшении. Поиск талантливой молодежи должен быть поставлен нами как первостепенная задача. Необходимо провести работу по обновлению и созданию новых учебников и учебных пособий, обеспечить издание научно-популярных работ по геокриологии. Необходимо использовать современные информационные технологии для распространения геокриологических знаний. Следует применять лучшие отечественные и зарубежные методики преподавания, в том числе и развитие дистанционных методов.

Ввиду важного значения, которое имеет Арктика для развития страны, и прежде всего для развития добывающих отраслей промышленности, необходимо развивать связи с производственными компаниями и предприятиями, работающими в криолитозоне, включая шельф Арктических морей. Требуется обеспечить участие студентов в совместных работах, добиваться развития практик и стипендий от научных и производственных организаций.

Кроме того, важно поддерживать новые, развивающиеся научные исследования, в числе которых экологическая геокриология, биогеохимия и микробиология мерзлых пород, криогенные ресурсы Земли.

## Заключение

Современный этап развития криолитозоны характеризуется стрессовыми техногенными воздействиями и активизацией опасных природных процессов, особенно в связи с реализацией крупномасштабных проектов добычи и транспортировки природного газа. На Крайнем Севере и Арктическом побережье России повсеместно распространены толщи мерзлых пород, строение, состав и льдистость которых определяют их большую чувствительность к изменениям условий теплообмена. Изменение теплового режима мерзлоты и криогенные процессы, по некоторым подсчетам, оказываются причиной 23% отказа технических систем и 29% потерь добычи углеводородов. Реакция на естественную динамику климата и изменения ландшафтной обстановки носит циклический характер и проявляется в длительные

периоды времени. Комплексное изучение природных изменений может осуществляться на стационарах, осуществляющих наблюдение за динамикой верхних горизонтов криолитозоны. Высокая эффективность стационарных многолетних исследований была показана в процессе деятельности ряда таких полигонов, получивших широкое развитие в северных районах России в 1960-1980 годах прошлого века, а затем в основном свернутых. В настоящее время накоплен опыт освоения территорий в криолитозоне с разными видами инженерных объектов, однако в целом испытывают деформации около 40% всех инженерных сооружений в криолитозоне. К настоящему времени установлены реологические свойства мерзлых грунтов, снижение их прочности и развитие деформации во времени, предложены уравнения для оценки несущей способности оснований сооружений, однако уровень внедрения этих работ в практику строительства не отвечает современным технологическим требованиям, требуются новые методы прогноза свойств грунтов.

В связи со значительными инженерно-геологическими и экологическими проблемами территорий Сибири и Крайнего Севера, высокой долей деформированных сооружений, особое внимание при инженерных изысканиях и проектировании уделять вопросам экологической безопасности и эксплуатационной надежности, мониторингу природной среды, и учитывать это при разработке новых нормативных документов в данной области. Следует разработать, в том числе на базе современных ГИС технологий, национальную комплексную программу мониторинга состояния криолитозоны Российской Федерации, соответствующую коллективную базу данных и аналитический центр;

Открытие новых веществ, материалов, технологий на базе и для нужд связанных с криолитозоной производств, обязывает ученых и специалистов разных профессий направить свой поиск на раскрытие тайн холодного мира, выявление новых, таящихся в мерзлоте ресурсов и минимизацию рисков, связанных с высокой динамичностью процессов в Арктической криолитозоне России, как при потеплении, так и при похолодании климата, а также при техногенных воздействиях.

Очень полезным для дальнейшего познания криолитозоны Арктики будет объединение усилий ученых РАН и научно-педагогических коллективов Вузов. Примером такого объединения может служить совместная работа с кафедрой геокриологии МГУ, Научно-образовательный центр (НОЦ) ИКЗ СО РАН и МГГРИ-РГГРУ, на основе которого сформирована базовая кафедра криосферы, многолетняя плодотворная работа организованной ИКЗ СО РАН кафедры геокриологии в ТюмГНГУ, создание академической кафедры криософии в ТюмГУ.

**Литература**

1. Варламов С. Тепловые свойства воды. // Квант, 2002, №3, с.10-12.
Васильев А.А., Дроздов Д.С., Москаленко Н.Г. Динамика температуры многолетнемерзлых пород Западной Сибири в связи с изменениями климата // Криосфера Земли, 2008, Том XII, № 2, с. 10-18.
2. Губарьков А.А., Лейбман М.О., Хомутов А.В. Криогенные процессы в естественных и техногенных условиях на Харасавэйском месторождении // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 2012. № 4, с. 21-27.
3. Долгих Г.М., Окунев С.Н., Стрижков С.Н. Строительство объектов в криолитозоне с использованием инновационных систем термостабилизации грунтов оснований // Десятая Межд. Конф. по мерзлотоведению (TICOP). Том 3. – Тюмень: Печатник, 2012, с.153-157.
4. Коваленко В.В.Градиентные структурно-фазовые состояния в сталях: способы формирования, масштабы реализации, закономерности: дисс. ... д-р физ.-мат. наук: Физика конденсированного состояния. – Новокузнецк, 2012, – 470 с.
5. Кондратьев В.Г. Криогенные риски и ресурсы железных дорог в криолитозоне // Десятая Межд. Конф. по мерзлотоведению (TICOP). Том 3. – Тюмень: Печатник, 2012, с. 235-240.
6. Курчатова А.Н., Мельников В.П., Рогов В.В. Газосодержащие кристаллиты льда в глинистых

породах // Доклады Академии наук, 2014, том 459, № 6, с. 1–4.
7. Ландшафты криолитозоны Западной-Сибирской газоносной провинции / Под. Ред. Е.С. Мельникова. – Новосибирск: Наука, 1983, 165 с.
8. Мельников В.П. К созданию цельного образа криосферы. // Криосфера Земли, 2014, т.XVIII, № 4, с. 3-12.
9. Мельников В.П., Брушков А.В., Хименков А.Н. О развитии теоретических основ геокриологии // Криосфера Земли 2015, №2, с.6-14.
10. Мельников В.П., Дроздов Д.С., Малкова Г.В. Климатические и криогенные факторы обустройства северных территорий // Геология и разведка, 2009, т.XV, №6, с.75-82.
11. Мельников В.П., Дроздов Д.С., Малкова Г.В. О криогенных ресурсах в связи с экологической доктриной // Северное измерение глобальных проблем. Первые итоги Международного полярного года. – М.: Наука, 2009, с.57-73.
12. Павлов А.В., Малкова Г.В. Динамика криолитозоны в условиях меняющегося климата XX-XXI веков // Известия РАН, сер. географическая, 2010, №5, с. 59-66.
13. Павлов А.В., Малкова Г.В. Мелкомасштабное картографирование трендов современных изменений температуры грунтов на севере России // Криосфера Земли, 2009, т. XIII, №4, с. 32-39.
14. Пендин В.В., Ганова С.Д. Геоэкологический мониторинг территорий расположения объектов транспорта газа в криолитозоне – М.: ОАО «ПНИИИС», 2009, 236 с.
15. Пономарева О.Е., Гравис А.Г., Бердников Н.М. Динамика криогенных процессов в северной тайге Западной Сибири в условиях меняющегося климата // Десятая Межд. Конф. по мерзлотоведению (TICOP). Том 3. – Тюмень: Печатник, 2012, с. 431-436.
16. Слагода Е.А., Опокина О.Л., Курчатова А.Н., Рогов В.В. Строение и генезис подземных льдов в верхненеоплейстоцен-голоценовых отложениях мыса Марре-Сале (Западный Ямал). // Криосфера Земли, №2, 2012, с.9-22.
17. Украинцева Н.Г., Дроздов Д.С., Попов К.А., Гравис А.Г., Матышак Г.В. Ландшафтная индикация локальной изменчивости свойств многолетнемёрзлых пород (уренгойское месторождение, Западная Сибирь). // Криосфера Земли, 2011, T.XV, №4, с.37-40.
18. Флинт Р.Ф. История Земли. – М.: Прогресс, 1978. – 357 с.
19. Хомутов А.В., Лейбман М.О., Андреева М.В. Методика картографирования пластовых льдов Центрального Ямала // Вестник Тюменского государственного университета. 2012. № 7, с. 76-84.
20. Шавлов А.В., И.В.Соколов, С.Н.Романюк, В.А.Джуманджи. Признаки пространственного упорядочения капель воды в атмосферном тумане // Криосфера Земли, 2014, т.XVIII, №1, с. 39-46
21. Brouchkov, A.V., Griva, G.I., Karnaukhov, N.N., Melnikov, V.P., Repin, V.E., Sukhovei, Yu.G., Milovanov, V.I., Filin, V.A., 2010. A strain of Bacillus sp. bacteria, with immunomodulatory and geronto-protective activity. Patent 2413760 RF. Claim 2009116228/10. Claimed on 29.04.09, published on 10.11.10, Bull. 24.
22. Fedorets, A.A., 2004. Drop clusters. Letters to ZhTF 79 (8), pp. 457–459.
23. Friedmann, E.I. 1994. *Permafrost* as *microbial habitat, i*n: D.A. Gilichinsky (Ed.), Viable *Microorganisms* in *Permafrost*. Russian Academy of Sciences, Puschino, pp. 21-26.
24. Istomin V.A., Yakushev V.S., 1992. Natural Gas Hydrates. Nedra, Moscow, 236 pp. (in Russian)
25. Melnikov V.P., Drozdov D.S. Distribution of permafrost in Russia. // Advances in the Geological Storage of Carbon Dioxide: International approaches to reduce anthropogenic greenhouse gas emissions / Lombardi S.; Altunina L.K.; Beaubien S.E. (Eds.) – New York, Boston, Dordrecht, London, Moscow: Kluwer Academic Publishers, NATO Science Series IV: Earth and Environmental Sciences, Vol. 65, 2006, XV, pp.69-80.
26. Melnikov, V.P., Melnikova, A.A., Anikin, G.V., Ivanov, K.S., Spasennikova, K.A., 2014. Building on permafrost: engineering solutions for energy efficiency. Earth Cryosphere (Kriosfera Zemli) XVIII (3), pp. 82-91 .
27. Melnikov, V.P., Nesterov A.N., Reshetnikov A.M., Istomin V.A. 2011. Metastable states during dissociation of carbon dioxide hydrates below 273 K. Chemical Engineering Science 66, pp. 73–77.
28. Melnikov, V.P., Rogov, V.V., Kurchatova, A.N., Brushkov, A.V., Griva, G.I., 2011c. Distribution of microorganizms in frozen ground. Earth Cryosphere (Kriosfera Zemli) XV (4), 75–78.
29. Ponte L. The Cooling. Prentice-Hall. – Englewood Cliffs, New Jersey, 1976. 306 p.
30. Shavlov A.V., Sokolov I.V., Romanyuk S.N., Dzhumandzhi V.A. Dropwise chains as the elements of water fog spatial structure. Phys. Lett., 2013, A 377, pp. 1740-1744.