



М.Н. ЖЕЛЕЗНЯК
доктор геолого-
минералогических наук,
директор Института
мерзлотоведения
им. П.И. Мельникова
СО РАН

e-mail:
fe1957@mail.ru,



А.Н. ФЕДОРОВ
кандидат геолого-
минералогических наук,
заместитель
директора Института
мерзлотоведения
им. П.И. Мельникова
СО РАН

e-mail:
fedorov@mpi.ysn.ru

УСТОЙЧИВОСТЬ ПРИРОДНЫХ СИСТЕМ И ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ В АРКТИКЕ И СУБАРКТИКЕ

DOI: 10.25801/SRC.2020.73.31.017

УДК 551.345:551.4

АННОТАЦИЯ: в последние три десятилетия в связи с современными изменениями климата и антропогенными нарушениями на территории Якутии происходит активизация криогенных процессов, которые негативно отражаются в ландшафтах и социально-экономической сфере в области вечной мерзлоты. Оценка современного состояния и тенденций развития мерзлотных ландшафтов Якутии в условиях глобального изменения климата и их влияние на устойчивость инженерных сооружений являются важной задачей для развивающихся районов Арктики и Субарктики России. Сильнольдистые криогенные ландшафты, занимающие около 30 % территории Якутии, в условиях современного потепления климата находятся в критическом состоянии. Результаты полевых наблюдений показывают, что любое антропогенное воздействие может привести к деградации вечной мерзлоты и ухудшению социально-экономической ценности этих ландшафтов. С этими ландшафтами в Якутии связаны наиболее населенные территории – аласные районы. Поэтому проблема изучения тенденций развития криогенных ландшафтов имеет не только экологическую, но и социально-экономическую, культурную и историческую актуальность.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: глобальное потепление, температура воздуха, мерзлотный ландшафт, инженерные сооружения, Якутия.

Потепление климата во второй половине XX века вызвало почти повсеместное повышение температуры почвогрунтов в криолитозоне России [1, 2, 3]. Нарушение природного равновесия, связанное с современным потеплением климата и антропогенным воздействием, вызывает развитие криогенных процессов, что приводит к дестабилизации ландшафтов в Арктике и Субарктике. Наиболее чувствительными к потеплению климата являются криогенные ландшафты с подземными льдами в литогенной основе.

Практически вся территория Республики Саха (Якутия) расположена в зоне многолетней мерзлоты. Основная часть республики, составляющая свыше 80 % площади, находится в зоне сплошной криолитозоны, где мощность мерзлых пород составляет свыше 400 м [4]. Максимальная мощность криогенной толщи – 1500 м зафиксирована в верховье бассейна р. Вилюй. Здесь толща мерзлоты прерывается лишь подруслыми и подозерными таликами.

В современный период изменения климата оказались наиболее чувствительными в арктических и субарктических районах. Якутия в этом отношении оказалась в зоне наибольшего потепления. Наиболее серьезные изменения в климате Якутии произошли с 1990-х годов. М.К. Гавриловой, 2009 [5] отмечено сильное влияние повышения зимних температур. Ю.Б. Скачков, 2016 [6] проанализировал пространственную дифференциацию повышения температуры воздуха за 1966-2016 годы и отметил повышение средней годовой температуры воздуха в Якутске на 3°C, Вилюйске – на 2,2°C, Верхоянске – на 1,8°C и Оймяконе – на 2,2°C.

В последние десятилетия и мерзлотные условия претерпели заметные изменения. За 1965-2005 гг. в Восточной Сибири тренды изменения средней годовой температуры грунтов в большинстве случаев составили от 0,01 до 0,03°C/год [7], а в некоторых регионах – до 0,06°C/год [8], и эти значения вполне имеют место и в настоящее время. При этом наибольшие зна-

MIKHAIL ZHELEZNYAK
 Doctor of Geography
 and Mineralogy
 Director of the Pyotr
 Melnikov's Permafrost
 Institute SD RAS

e-mail:
 fe1957@mail.ru

Aleksandr FEDOROV
 Candidate of Geography
 and Mineralogy
 Vice-Director of the Pyotr
 Melnikov's Permafrost
 Institute SD RAS

e-mail:
 fedorov@mpi.ysn.ru

RESILIENCE OF ENGINEERING CONSTRUCTIONS AND LINEAR TRANSPORT SYSTEMS IN THE ARCTIC AND SUBARCTIC REGION

ABSTRACT: Current climatic changes and anthropogenic disturbances have intensified the development of permafrost-related processes in Yakutia during the last two decades, adversely affecting the landscapes and socio-economic conditions in this permafrost region. The main purpose of this paper is to assess the current state and trends in permafrost landscapes in Yakutia under global climate change. It provides a review of the current scientific literature, as well as analysis of field observations at monitoring sites of the Melnikov Permafrost Institute. The ice-rich permafrost landscapes which occupy about 25 % of Yakutia are in a critical condition under the current climate warming. The results of field observations show that any anthropogenic impact can lead to permafrost degradation and deterioration of the socio-economic value of these landscapes. Alases, which are related to these landscapes, are the most populated areas in Yakutia. Understanding the trends in permafrost-landscape dynamics has therefore not only ecological, but also socio-economic, cultural and historical importance.

KEY WORDS: global warming, air temperature, permafrost landscape, engineering structures, Yakutia.

чения характерны для районов Центральной Якутии, наименьшие – для арктических районов. Такие изменения температуры воздуха, конечно же, оставили свой след в развитии мерзлотных ландшафтов Якутии. Повышение температуры мерзлых пород и увеличение глубины протаивания, активизация криогенных процессов вызывают преобразование ландшафтов.

Мерзлотные ландшафты с ледовым комплексом характеризуются неустойчивым состоянием при современных изменениях климата и антропогенных воздействиях. Формирование ландшафтов с ледовым комплексом связано с оледенениями в сартанское (около 23-25 тыс. лет назад) и зырянское время (около 40-45 тыс. лет назад). Ледовый комплекс представляет собой мерзлую толщу пород, насыщенную повторно-жильными льдами [9]. Повторно-жильные льды формируются в виде полигональной решетки в результате замерзания воды в морозобойных трещинах. Максимальная мощность повторно-жильных льдов составляет 40-60 м, объемная льдистость отложений ледового комплекса изменяется от 50 до 80 % (рис. 1). Ледовый комплекс занимает примерно 11 % территории Республики Саха (Якутия).

Многие исследователи отмечают достаточно активное изменение мерзлотных ландшафтов. Так, А. Morgenstern и др., 2011 [10], изучая мерзлотные ландшафты дельты р. Лены, отмечает достаточно большую плотность молодых термокарстовых озер на ледовом комплексе (едоме) с сильнольдыстыми отложениями,



Рис. 1
 Выходы повторно-жильных льдов в районе с. Сырдах Усть-Алданского района в Центральной Якутии

что доказывает активность современного термокарста. На мониторинговом полигоне Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН около пос. Тикси отмечается активизация термокарста с 2004 по 2014 год, это проявилось в виде вытаивания жильных льдов в предгорной полигонально-валиковой тундре глубиной до 1-1,5 м.

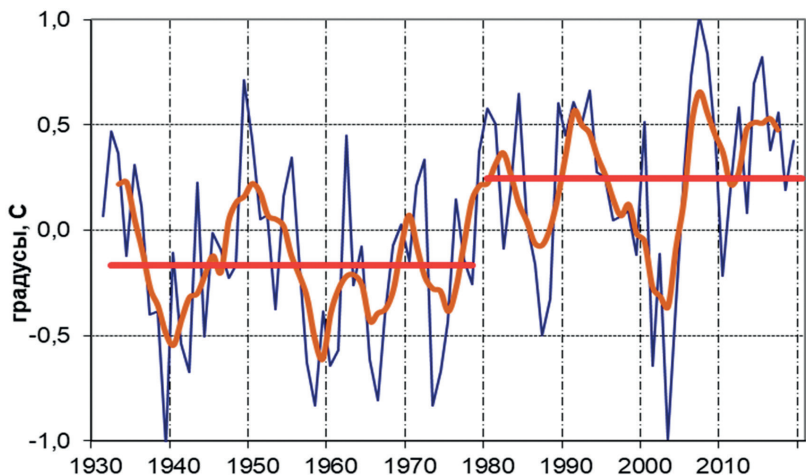


Рис. 2

Изменчивость средней годовой температуры грунтов Центральной Якутии на глубине 3,2 м.

Данные международной программы CALM (<http://www.gwu.edu/~calm/data/north.html>) показывают, что в тундре низовья р. Колымы за 2005-2010 гг. глубина протаивания на площадках в среднем увеличилась на 17 % по сравнению с 1996-2004 гг., что в среднем составляет 10 см (при разбросах от 3 до 23 см). В окрестности пос. Тикси средняя годовая температура грунтов на глубине 10 м в 2005-2014 гг. была на 0,8°C теплее, чем в 1993-2004 гг. при среднем многолетнем значении -10,9°C. По данным метеостанции Верхоянск, на глубине 1,6 м разница температуры грунтов в тот же период составила 1,3°C при средних многолетних значениях -7,2°C.

В Центральной Якутии температура грунтов на глубине 3,2 м за 1931-1978 гг. была холоднее средней многолетней температуры на 0,17°C, а с 1979 по 2019 год отмечалось ее повышение на 0,25°C (рис. 2). Это повышение температуры грунтов сыграло большую роль в изменениях мерзлотных ландшафтов.

Наши наблюдения за динамикой термокарста в Центральной Якутии подтверждают, что именно в последние десятилетия происходит активизация просадок поверхности. Резкое изменение ландшафтов Центральной Якутии связано с обильными осадками и переувлажнением грунтов в 2005-2007 гг. на фоне об-

щего потепления климата. В целом потепление климата создало довольно критическую ситуацию в нарушенных и безлесных участках, развитых на ледовом комплексе. Это связано с просадками грунтов при вытаивании верхних частей повторно-жильных льдов и развитием термокарстовых озер. На мониторинговом полигоне Юкэчи Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, близ с. Беке Мегино-Кангаласского района Республики Саха (Якутия), за 1980-2016 гг. площади молодых термокарстовых озер увеличились в 2,5 раза, продолжается активное образование новых озер (рис. 3).

В настоящее время имеется несколько прогнозных оценок развития вечной мерзлоты на севере Евразии. А.В. Павлов и Г.Ф. Гравис [11] прогнозируют быстрые темпы деградации, что в 2050 г. зона тающих вечномерзлых грунтов достигнет широты р. Вилюй. Профессор Университета Аляски из Фэрбенкса (США) V.E. Romanovsky с соавторами [12] предполагают, что в течение XXI века произойдет наступательное развитие деградации вечной мерзлоты и к 2100 г. зона деградации дойдет до широты г. Якутска.

N. Shiklomanov с соавторами [16] на основе изучения состояния российских городов, построенных на вечной мерзлоте, пришли к выводу, что при современ-

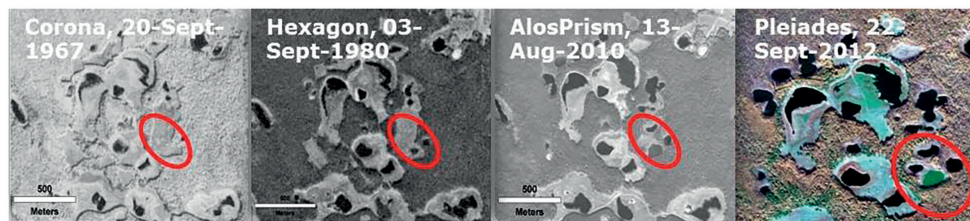


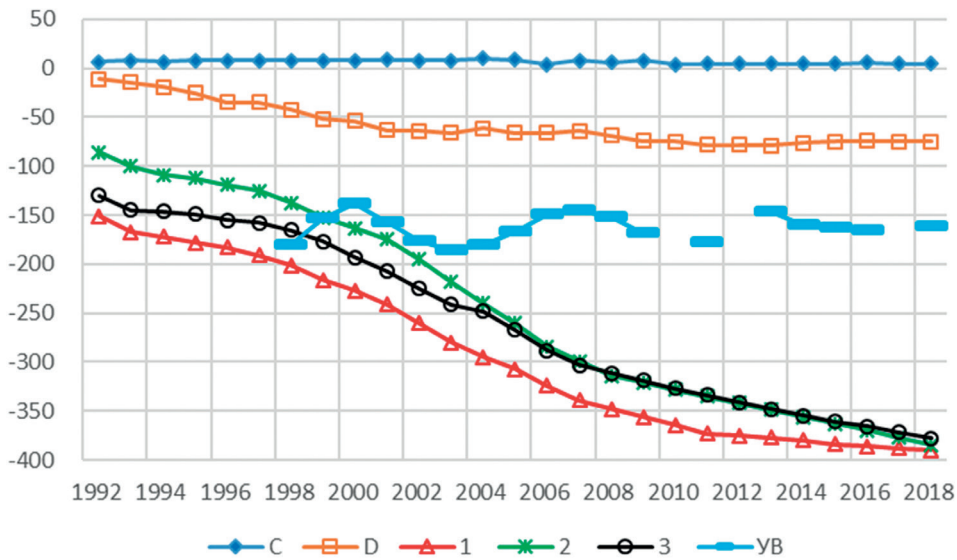
Рис. 3



Изменение мерзлотных ландшафтов при развитии термокарста в районе мониторингового полигона Юкэчи

1993 1998 2003 2008 2013

Рис. 4



Динамика просадок на термокарстовом понижении на площадке 2 на мониторинговом полигоне Юкэчи близ с. Беке Мегино-Кангаласского района

ном потеплении потеря несущей способности свайных фундаментов с 2020 по 2050 г. будет существенной, что может привести к техногенным катастрофам.

Хотя такие прогнозы делались на вариант максимальных изменений климата и мы пока не знаем реальных значений будущего глобального потепления, результаты моделирования настораживают. Последние публикации о деградации повторно-жильных льдов в арктической зоне вечной мерзлоты говорят о повсеместной активизации криогенных процессов [14]. Наши наблюдения на мониторинговых полигонах в Центральной Якутии подтверждают эти результаты. На открытых луговых участках ледового комплекса наблюдаются высокие темпы деградации подземных льдов и широкое развитие термокарста (рис. 4). Образование полигонального просадочного микрорельефа является индикатором этого явления (рис. 5).

На основе Мерзлотно-ландшафтной карты Республики Саха (Якутия) [15] была составлена карта льди-

стости поверхностных отложений Якутии (рис. 6). Мерзлотные ландшафты со слабльдистыми отложениями (с объемной льдистостью менее 0,2) занимают 38,7 % территории Якутии, ландшафты с относительно льдистыми отложениями (0,2-0,4) – 30,1 %, а льдистые ландшафты (больше 0,4) – 31,2 %. Мерзлотные ландшафты с объемной льдистостью больше 0,4 в условиях глобального потепления климата являются неустойчивыми при антропогенных нарушениях, с объемной льдистостью 0,2-0,4 – относительно неустойчивыми. Относительно устойчивыми являются слабльдистые территории. Таким образом, освоение около 70 % территории Якутии требует специального отношения к освоению.

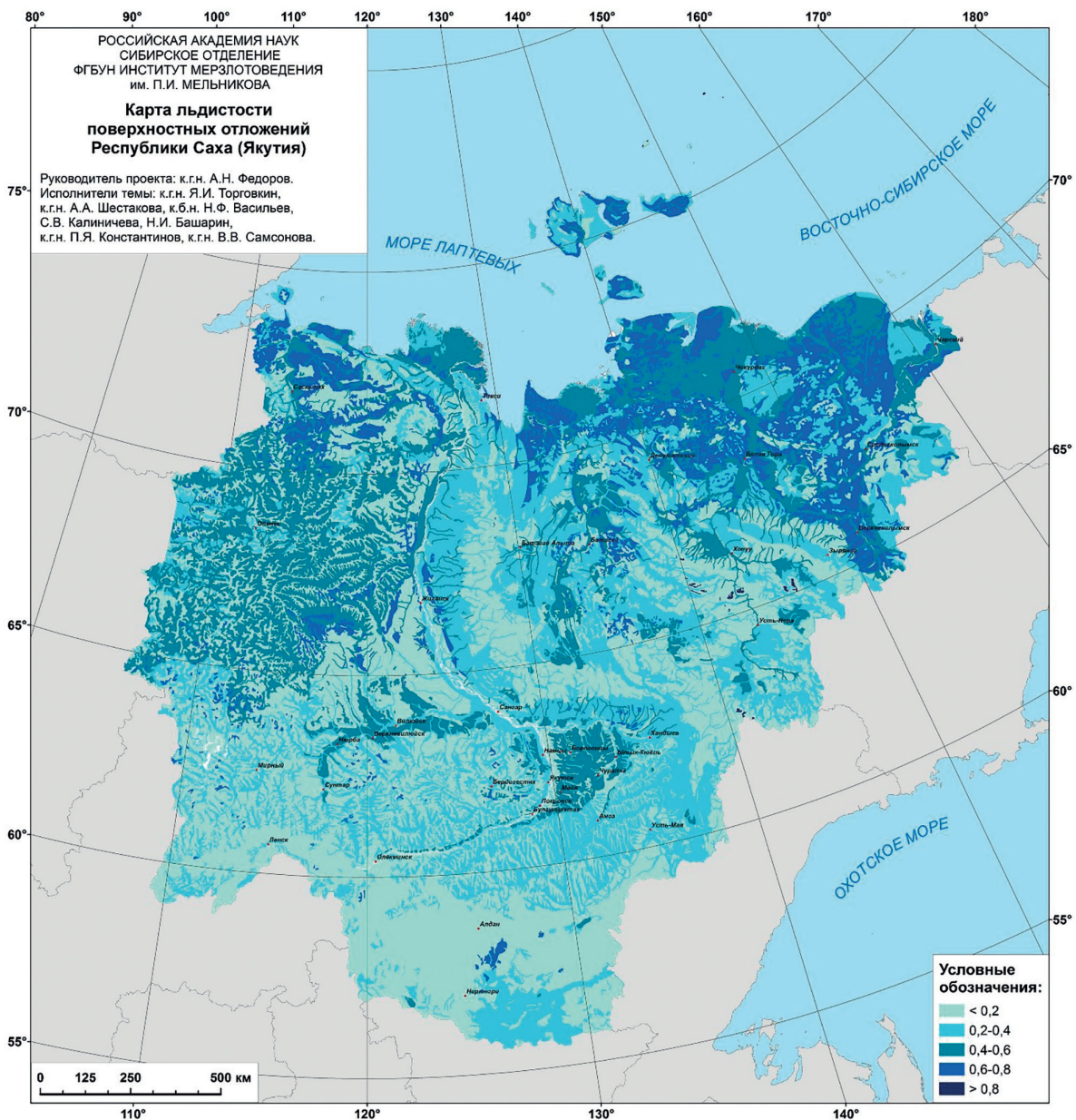
Перспективы экономического и социального развития арктических и субарктических регионов в настоящий период неразрывно связаны с освоением природных ресурсов и развитием надежной транспортной сети.



Рис. 5

Виды нарушенных земель из-за деградации повторно-жильных льдов: заброшенная пашня в районе с. Сырдах Усть-Алданского района (а) и территория бывшего аэродрома в с. Чурапча (б) в Центральной Якутии.

Рис. 6



Карта льдистости поверхностных отложений Якутии

В области распространения многолетнемерзлых пород лед является породообразующим минералом, и своеобразие грунтов подчеркивается динамичными изменениями их свойств в зависимости от температуры, давления и других факторов. Это определяет геодинамическое состояние территории и устойчивость оснований конструкций. Вследствие этого оценка геокриологических условий и прогноз возможного их развития являются важными компонентами в обеспечении безопасности и эффективности работы инженерных сооружений в северных регионах.

Начальным этапом для обоснования строительства инженерных объектов являются инженерно-геологические изыскания. Они проводятся с целью объективной оценки инженерно-геологических условий территории, получения фактических материалов для

выполнения прогноза устойчивости природно-технических систем и выбора обоснованного проектного решения. В настоящее время имеющиеся нормативные документы не в полной мере обеспечивают полноту и раскрывают наиболее эффективные методы и методику получения информации при проведении этих работ в области криолитозоны. Кроме того, по ряду территорий отсутствуют территориальные нормативные документы, которые учитывают региональные особенности получения необходимой информации в процессе изысканий.

В современный период в России вызывает серьезную озабоченность тенденция проведения изысканий организациями и временными коллективами, не понимающими реальных затрат и объемов работ при выполнении качественных изысканий в криолитозо-

не, допускающими формальное отношение (игнорирование) в изучении подземных вод, которые определяют гидрогеологические и инженерно-геологические условия территорий строительства, влияют на кинетику и механику криогенных процессов и явлений.

Проблема управления мерзлотно-гидрогеологическими условиями является ключевой в обеспечении устойчивости инженерных сооружений. В.А. Кудрявцевым и Э.Д. Ершовым была предложена классификационная схема приемов управления мерзлотными процессами, в которой выделены 4 группы. Применение этих приемов невозможно выполнить без оценки реальных климатических и инженерно-геокриологических условий и эффективных технологий и материалов. Опыт организации и проведения подобных опытно-экспериментальных работ в криолитозоне невелик, можно лишь отметить отдельные экспериментальные площадки в Китае и Канаде. В России подобные работы выполнялись фрагментарно и были направлены на решение конкретных задач, в большинстве случаев на аварийных объектах или участках линейных сооружений. Для этого преимущественно использовались кратковременно действующие пункты наблюдений за изменением температуры грунтов или организовывались площадки для оценки воздействия на конструкции какого-либо криогенного процесса.

Строительство инженерных сооружений на Севере требует особого подхода в связи с суровыми и сложными природно-климатическими условиями. Решить все проблемы сразу невозможно, их необходимо изучать, наблюдать, создавая режимные сети природных и технических полигонов. Именно создание мониторинговой сети – единственно действующая система по обеспечению информации для ретроспективного и перспективного анализа опыта строительства в криолитозоне, разработке рациональных управляющих воздействий и превентивных мероприятий по обеспечению их эксплуатационной эффективности. К сожалению, чаще всего о мониторинге технических сооружений вспоминают при возникновении ситуаций, затрудняющих их эксплуатацию. Несомненно, система мониторинга должна функционировать начиная с периода технического обоснования строительства инженерного объекта, в период его эксплуатации, а после завершения его эксплуатации – до перехода природно-технической системы в природную.

Опыт работ ИМЗ СО РАН на автомобильных дорогах в Сибири показал необходимость организации наблюдательных полигонов, где будет проходить изучение и оценка взаимодействия «инженерное сооружение – природная среда».

Анализ материала, полученного в процессе инженерно-геологических изысканий и научных исследований, позволил нам выделить ряд необходимых мероприятий, позволяющих повысить качество автомобильных дорог при их строительстве и эксплуатации в криолитозоне:

1 – проведение районирования территории по степени устойчивости сооружения в реальных инженер-

но-геокриологических и климатических условиях в процессе его строительства и эксплуатации;

2 – выполнение научного сопровождения инженерно-изыскательских работ;

3 – создание опытно-методического научно-исследовательского полигона и мониторинговой сети по изучению устойчивости автомобильных дорог в криолитозоне;

4 – более широкое использование методов математического и натурального моделирования при разработке проектных решений и прогнозов состояния автомобильных дорог и инженерных конструкций;

5 – широкое использование технологий эстакадного строительства, теплоизолирующих материалов, охлаждающих систем на участках со сложными инженерно-геокриологическими условиями.

Институтом мерзлотоведения СО РАН разработана уникальная структура опытно-методического полигона. Такой полигон, несомненно, должен стать научно-исследовательской и испытательной базой для строительства автомобильных дорог в криолитозоне. Для его создания именно в Якутии есть все предпосылки: наличие строящихся и реконструируемых дорог общей протяженностью более 8 000 км, многообразие мерзлотно-климатических условий, наличие высококвалифицированных кадров.

В настоящее время именно в нашей республике при наличии Якутского научного центра СО РАН, СВФУ, собственной Академии наук существует мощная научная и инженерно-техническая база для создания Международного опытно-испытательного полигона по обеспечению устойчивости автомобильных дорог в криолитозоне.

Еще одной не менее значимой проблемой технического и социально-экономического характера, в том числе и в развитии дорожного строительства северных территорий, является вовлечение в научно-производственную работу молодых специалистов и студентов образовательных учреждений. Это позволит подготовить специалистов с высокой культурой и пониманием необходимости единства возводимых систем и природных условий, реально знающих проблемы и условия эксплуатации сооружений.

Существенным отличием природной среды северных регионов Земли, как уже отмечалось являются суровые климатические условия и наличие многолетней мерзлоты, которые определяют особенности жизнеобеспечения на Севере. Учитывая специфичность, сложность и динамичность природно-технических систем северных регионов, необходимо вести научное сопровождение (с подключением специализированных организаций) при проектировании, реконструкции и строительстве инженерных сооружений. Это позволит в ближайшее время получить новые фундаментальные знания и количественные характеристики о преобразовании природно-технических систем, разработать работоспособные нормативные документы.

Сегодня также необходимо найти пути взаимодействия и сотрудничества научных организаций и компаний, осуществляющих работу на территории

лицензионных участков. Компании, ведущие деятельность на территории природных систем, совместно с научными организациями могут и должны создавать эффективные системы мониторинга состояния природной среды. Это связано в первую очередь с мерзлотными и экологическими условиями, определяющими устойчивость и безопасность жизнедеятельности на Севере. Это может быть идеальный тандем получения новых знаний о природной среде, устойчивости инженерных систем, что в дальнейшем позволит разработать проекты и рекомендации для экологически и технически безопасного освоения северных регионов.

Взаимосвязь климат – мерзлота, оценка современного состояния и тенденций развития мерзлотных ландшафтов и инженерно-геокриологических условий определяют устойчивость природной среды

и инженерных сооружений. Эта задача требует комплексного научного подхода и является важнейшей для развивающихся районов Арктики и Субарктики.

Лесные массивы таежных зон Субарктики отличаются особенностью восстановления и развития криогенных процессов. В связи с этим на территориях освоения и вырубках необходимо разработать регламенты лесозаготовок, учитывающие геоморфологические и мерзлотные условия участков.

Совершенствование законодательной и нормативной системы жизнеобеспечения является тем путем, по которому должно развиваться мировое сообщество. Сегодня необходимо дальнейшее совершенствование и внедрение в практику жизни нашего государства и мирового сообщества разработанного и принятого в РС (Я) Закона «О рациональном пользовании и сохранении вечной мерзлоты».

ЛИТЕРАТУРА И ИСТОЧНИКИ:

1. Анисимов О.А. Об оценке чувствительности вечной мерзлоты к изменению глобального термического режима земной поверхности. *Метеорология и гидрология*, 1989, №1, 79-84.
2. Павлов А.В. Реакция криолитозоны на современные и ожидаемые в XXI веке климатические изменения. *Разведка и охрана недр*, 2001, №5, 8-14.
3. Iijima Y., Fedorov A.N., Park H., Suzuki K., Yabuki H., Maximov T.C. and Ohata T. 2010. Abrupt Increases in Soil Temperatures following Increased Precipitation in a Permafrost Region, Central Lena River Basin, Russia. *Permafrost and Periglacial Process*. 21: 30–41.
4. Соловьев П.А. Зональность распространения и региональные особенности многолетней криолитозоны. Масштаб 1:12 000 000 / Карта-врезка в Мерзлотно-ландшафтной карте Якутской АССР. Масштаб 1: 2 500 000 / Ред. П.И.Мельников. – М.: ГУТК, 1991.
5. Гаврилова М.К. Изменения климата (температуры воздуха и осадки) на территории Якутии и возможности его влияния на сельское хозяйство. *Наука и образование*, 2009, №3, 48-54.
6. Скачков Ю.Б. Динамика изменения среднегодовой температуры воздуха в Республике Саха Якутия за последние 50 лет // Труды IX международного симпозиума «Баланс углерода, воды и энергии и климат бореальных и арктических регионов с особым акцентом на восточную Евразию. 1-4 ноября 2016 г., Якутск, Россия. – Наоя: Изд-во Университета Наоя, 2016. – С. 208-211.
7. Павлов А.В., Малкова Г.В. Мелкомасштабное картографирование трендов современных изменений температуры грунтов на Севере России. *Криосфера Земли*, 2009, т. XIII, № 4, 32–39.
8. Fedorov, A.N., Ivanova, R.N., Park, H., Hiyama, T., Iijima, Y. 2014. Recent air temperature changes in the permafrost landscapes of northeastern Eurasia, *Polar Science*, Vol. 8, Issue 2, 114-128.
9. Соловьев П.А. Криолитозона северной части Лено-Амгинского междуречья. – М.: Изд-во АН СССР, 1959. – 144 с.
10. Morgenstern A., Grosse G., Gunther F., Fedorova I., and Schirrmeister L. 2011. Spatial analyses of thermokarst lakes and basins in Yedoma landscapes of the Lena Delta. *The Cryosphere*, 5, 849–867.
11. Павлов А.В. и Гравис Г.Ф. Вечная мерзлота и современный климат. *Природа*, 2000, №4, 10-18.
12. Romanovsky V.E., Kholodov, A.L., Marchenko, S.S., Oberman, N.G., Drozdov, D.S., Malkova, G.V., Moskalenko, N.G., Vasiliev, A.A., Sergeev, D.O., Zheleznyak, M.N. 2008. Thermal state and fate of Permafrost in Russia: First results of IPY. Ninth International Conference on Permafrost. Volume 2. – Fairbanks: Institute of Northern Engineering & University of Alaska. – Pp.1511-1518.
13. Shiklomanov, N.I., Streletskiy, D.A., Swales, T.B., Kokorev, V.A. 2016. Climate change and stability of urban infrastructure in Russian Permafrost regions: prognostic assessment based on GGM Climate projections. *Geographical review*: 1-18. DOI: 10.1111/gere.12214.
14. Liljedahl A.K., Boike J., Daanen R.P., Fedorov A.N., Frost U.V, Grosse G., Hinzman L.D., Iijima Y., Jorgenson J.C., Matveyeva N., Necsoiu M., Raynolds M.K., Romanovsky V.E., Schulla J., Tape K.D., Walker D.A., Wilson C.J., Yabuki H. and Zona D. 2016. Pan-Arctic ice-wedge degradation in warming permafrost and its influence on tundra hydrology. *Nature Geoscience*, 9, 312–318. DOI: 10.1038/NGEO2674
15. Fedorov A.N., Vasilyev N.F., Torgovkin Y.I., Shestakova A.A., Varlamov S.P., Zheleznyak M.N. et al. 2018. Permafrost-landscape map of the Republic of Sakha (Yakutia) at scale 1:1,500,000. *Geosciences*, 8, 465; doi:10.3390/geosciences8120465.