

УДК 551.345 (091)

DOI: 10.15372/GIPR20240406

М.Н. ЖЕЛЕЗНЯК, М.Н. ГРИГОРЬЕВ, А.Н. ФЁДОРОВ, В.В. ШЕПЕЛЁВ, А.А. КУТЬ

Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН,
677010, Якутск, ул. Мерзлотная, 36, Россия, fe1956@mail.ru, grigoriev@mpi.ysn.ru,
anfedorov@mpi.ysn.ru, vshepelev@mpi.ysn.ru, ann.urban@mail.ru

ОСНОВНЫЕ ИТОГИ ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ИНСТИТУТА МЕРЗЛОТОВЕДЕНИЯ ИМ. П.И. МЕЛЬНИКОВА СО РАН В ПЕРВЫЕ ДЕСЯТИЛЕТИЯ XXI ВЕКА

Дана краткая историческая справка и представлены основные результаты научно-исследовательской, научно-организационной и научно-популяризаторской деятельности Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН за первые два десятилетия XXI в. Приведены результаты работы института по различным направлениям, как фундаментальным, так и прикладным. Институт ведет исследования в области динамики континентальной и субаквальной криолитозоны Российской Арктики. Важное место занимает анализ реакции криогенных экосистем Арктической зоны России на глобальное потепление климата. Были достигнуты значительные успехи в области инженерного мерзлотоведения, организации мониторинга теплового состояния мерзлой толщи, в картировании мерзлоты и др. Результаты исследований института применяются для оценки устойчивости инженерных сооружений и автомобильных дорог, экологической безопасности северных городов, оптимизации использования агроземель криолитозоны, определения перспектив использования подмерзлотных вод криолитозоны в качестве альтернативного источника водоснабжения и криогенных ресурсов России. Отмечено, что основным условием успешного развития отечественной геокриологии является совершенствование приборно-лабораторной базы исследований, а также организация обмена знаниями и данными посредством конференций и совместных проектов при объединении усилий ученых из разных стран и организаций. Решение сложного комплекса геокриологических задач в этих условиях возможно при соответствующей поддержке со стороны государства.

Ключевые слова: криолитозона, динамика температурного режима, тепловое состояние, криогенные ландшафты, подземные воды, инженерное мерзлотоведение.

M.N. ZHELEZNYAK, M.N. GRIGORIEV, A.N. FEDOROV, V.V. SHEPELEV, A.A. KUT

Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
677010, Yakutsk, ul. Merzlotnaya, 36, Russia, fe1956@mail.ru, grigoriev@mpi.ysn.ru,
anfedorov@mpi.ysn.ru, vshepelev@mpi.ysn.ru, ann.urban@mail.ru

MAIN RESULTS OF GEOCRYOLOGICAL RESEARCH BY MELNIKOV PERMAFROST INSTITUTE SB RAS IN THE FIRST DECADES OF THE 21ST CENTURY

This paper presents a brief history of its foundation and the main results of scientific research, organizational and popularizing activities of Melnikov Permafrost Institute SB RAS for the last two decades of the 21st century. Results of the Institute in different areas, both basic and applied, are outlined. The institute is doing research into the dynamics of the continental and subaquatic permafrost zone within the Russian Arctic. Emphasis is placed on analyzing the Arctic cryogenic ecosystem for global climate warming. Significant progress has been achieved in engineering geocryology, permafrost monitoring, permafrost mapping, and other areas. The institute's research results are used in assessing stability of engineering structures and motor roads, and ecological security of northern cities, in optimizing the use of agricultural lands in the permafrost zone, and in determining the prospects for using subpermafrost water in the permafrost zone as an alternative source of water supply and cryogenic resources of Russia. It is pointed out that the main conditions for successful development of modern geocryology implies improvement of instrument and laboratory facilities used in research as well as organizing exchange of knowledge and data via conferences and cooperative projects by combining efforts of scientists from different countries and organizations. The solution of a complex set of geocryological problems in these conditions is possible with appropriate support from the state.

Keywords: cryolithozone, temperature regime dynamics, thermal state, cryogenic landscape, groundwater, engineering permafrost science.

ВВЕДЕНИЕ

Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова (ИМЗ) СО РАН был создан на базе существовавшей с 1941 г. Якутской научно-исследовательской мерзлотной станции (с 1956 г. — Северо-Восточное отделение) Института мерзлотоведения им. В.А. Обручева АН СССР (ИНМЕРО, Москва).

Принципиальное решение о создании института в Якутске было принято Постановлением Президиума АН СССР от 16.09.1960 № 899. Совет Министров РСФСР своим письмом от 02.11.1960 № 2.5897-350 рекомендовал Президиуму Академии наук СССР создать этот институт в структуре Сибирского отделения АН СССР. 9 декабря этого же года Президиум АН СССР Постановлением № 1043 за подписью президента АН СССР А.Н. Несмеянова принял решение о создании института «в целях развития региональных исследований вечномёрзлых горных пород Сибири, необходимых для обеспечения нужд народного хозяйства» и утвердил его структуру.

Становление института происходило весьма успешно по всем основным направлениям геоэкологической науки, включая и инженерно-прикладные исследования. Согласно уставу, основной деятельностью ИМЗ СО РАН является выполнение фундаментальных научных исследований и прикладных разработок в рамках следующих научных направлений: эволюция криолитозоны под воздействием природных и антропогенных факторов; тепловое и механическое взаимодействие инженерных сооружений с многолетнемерзлыми грунтами.

Организатором и бессменным руководителем института с 1960 по 1987 г. был один из основоположников геоэкологической науки академик Павел Иванович Мельников (1908–1994). С 1988 по 2003 г. директором был доктор технических наук Ростислав Михайлович Каменский (1936–2008), с 2004 по 2012 г. — доктор технических наук Рудольф Владимирович Чжан. С 2012 г. ИМЗ СО РАН возглавляет член-корреспондент РАН Михаил Николаевич Железняк.

Институт разрабатывает национально значимое для России направление научных исследований — геоэкологию (мерзлотоведение) и имеет обширную сеть мониторинга криолитозоны, занимающей 65 % территории России.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Институтом мерзлотоведения СО РАН в первые десятилетия XXI в. были поставлены и решены многие вопросы, связанные с изучением динамики криолитозоны и происходящими в ней процессами.

Амплитудно-частотный анализ длинных рядов измерений температуры воздуха (более 100 лет) показал, что современное потепление связано с естественными разнопериодными колебаниями климата и резонансным наложением положительных фаз этих колебаний. С 2010–2020 гг. прогнозируется похолодание климата. Таким образом, потепление климата в целом укладывается в рамки естественных температуроформирующих процессов.

Были составлены прогнозные сценарии возможного повышения температуры мерзлых горных пород в Западной Сибири и Якутии в XXI в. в случае реального существования парникового эффекта, вызванного удвоением содержания парниковых газов в атмосфере. Построенные модели указывают на возможное сокращение площади криолитозоны и ее мощности.

Проведен анализ длиннопериодных климатических колебаний на Земле. Установлено, что основополагающую роль в них играют космопланетарные и астропланетарные факторы, связанные с изменением орбитальных параметров Земли, Солнечной системы и Галактики. Наиболее значительные изменения в геосистеме происходили в периоды резонансных наложений амплитуд разнопериодных колебаний. Резонансные эффекты в последние 130 тыс. лет стали причиной глобальных потеплений и похолоданий климата, а также изменений площади развития и мощности криолитозоны. Космопланетарные климатические циклы с интервалом 1,3 млрд лет и 200 млн лет вызвали глобальные изменения природной среды Земли в фанерозое, самом теплом периоде развития нашей планеты. Колебания с интервалом 200 млн лет определили все катаклизмы и взлеты развития биосферы Земли, ее массы и разнообразия. Прослежены периоды возможных оледенений. В ближайшие 200–300 млн лет на Земле прогнозируется крупное похолодание климата, связанное с отрицательной фазой 1,3-миллиардного космопланетарного цикла [1].

Разработан новый численно-графический метод реконструкции палеотемпературы поверхности мерзлых пород на момент максимума сартанского оледенения (18 тыс. л. н.) и в голоцене по данным геотермических измерений в глубоких скважинах в районах с нестационарной криолитозоной (Западная Сибирь, Центральная Якутия). С помощью этого метода рассчитана палеотемпература и палеомощность мерзлых пород сартанского периода по 20 пунктам Западной Сибири, а также средняя

и оптимальная температуры пород в голоцене. Установлено, что средняя температура мерзлых пород и воздуха 18 тыс. л. н. была на 9–12 °С ниже современной. Переход от сартанского похолодания к голоценовому потеплению произошел очень быстро со скоростью 0,8–1,0 °С за тысячу лет. Средняя температура воздуха в голоцене на севере Западной Сибири мало отличалась от современной. В оптимум голоцена температура воздуха была выше современной на 1,0–1,5 °С. Положительные температуры на поверхности горных пород южнее Полярного круга установились 8,0–9,5 тыс. л. н. За это время мерзлые толщи протаяли на 100–150 м сверху и на 80–90 м снизу.

Построена и реализована двумерная физико-математическая модель термодинамических процессов в подмерзлотной зоне при длиннопериодных колебаниях климата Земли (40 тыс. лет), обусловивших смену теплых и холодных эпох в плейстоцене. Отмечено проявление под мерзлотой вакуумно-поршневого эффекта, связанного со значительными перепадами гидростатического давления в слабо открытой системе. На фазовой границе давление в процессе протаивания снизу может снижаться до нуля. При этом возникает компенсационный процесс внутрипорового испарения воды и мощный эффект всасывания. При промерзании водонасыщенных горных пород гидростатическое давление может достигать предела прочности пород. В результате этого появляются трещины всестороннего уплотнения и формируются ледяные структуры в толще мерзлых пород. Эти процессы обуславливают формирование пресных подмерзлотных вод на большой глубине [2].

Продолжалось изучение характера развития мерзлых пород в отдельных северных регионах России. Наиболее значимые региональные исследования были проведены ИМЗ СО РАН в рамках совместных программ с японскими, немецкими и американскими учеными при финансировании ими экспедиционных работ. С применением новейшей аппаратуры были детально изучены условия формирования ледового комплекса арктических низменностей и интенсивность его разрушения в современный период, установлена хронология отложений, в том числе пород подошвы ледового комплекса, возраст которых определяется в 94–114 тыс. лет. Выдвинута теория о нивальном происхождении отложений этого комплекса, выявлена их связь с криопланационными террасами. Накопление ледового комплекса закончилось 12–10 тыс. л. н. Осадконакопление продолжалось все это время в условиях открытых мерзлотных ландшафтов с эмбриональным оледенением в виде снежников [3]. В современном разрушении ледового комплекса участвуют процессы термокарста, термоэрозии, термоабразии и криосолифлюкции. Средняя многолетняя скорость разрушения берегов с ледовым комплексом составляет 2,2–2,5 м в год, а максимальная достигает 20 м в год. В результате этого объем поступающего в море осадочного материала сопоставим с его выносом крупными реками и составляет около 49 млн т в год [4, 5].

Разработана математическая модель эволюции криолитозоны Восточно-Сибирского моря, позволяющая оценить масштабы распространения, темпы трансформации и морфологические параметры субаквальных многолетнемерзлых пород в позднем кайнозое [6].

Институт продолжил исследования криолитозоны Памира и Тянь-Шаня силами своей высокогорной лаборатории в Алма-Ате. Изучены условия формирования, строение и температурный режим мерзлых пород в Северном Тянь-Шане. Проведена систематизация природных факторов, определяющих процессы сезонного и многолетнего промерзания пород. Реконструирована эволюция криолитозоны за последние 18–20 тыс. лет. В период максимума голоценового потепления (10–7 тыс. л. н.) средняя температура приземного воздуха в Казахстане превышала современную на 0,5–1,5 °С [7].

Изучены особенности формирования и распространения мерзлых пород в пределах Алданской антеклизы. Ведущую роль в формировании их температуры и мощности играет геолого-геоморфологическое строение региона. Инверсия температуры воздуха и внутриземной тепловой поток создают существенный контраст в значениях мощности мерзлых пород между речными долинами и водоразделами, а также между регионами разной тектонической активности. В результате этого мощность и площадь распространения мерзлых пород увеличиваются с севера на юг и с ростом высотных отметок. Итогом исследований стало составление карт температуры поверхности мерзлых пород и на глубине 2 км, где исчезает влияние рельефа, а также карт внутриземного теплового потока и мощности мерзлых пород. Построены субширотные и субдолготные мерзлотно-геотермические разрезы протяженностью до 450 км [8].

Особое место в тематике института продолжали занимать региональные исследования в области геоэкологии. На основе изучения взаимосвязей температуры воздуха и почвогрунтов, атмосферных осадков, глубины сезонного протаивания и продуктивности биоты проведена оценка изменчивости криоландшафтов Центральной Якутии за последние два десятилетия. Рассчитан эко-коэффициент, указывающий на предрасположенность природной среды к активизации криогенных процессов. Выполнена ландшафтно-теплофизическая дифференциация основных природно-территориальных комп-

лексов. На основе дешифрирования разновременных аэрофотоснимков и изучения изменчивости геоэкологических условий разработана методика ретроспективного и прогнозного картографирования динамики таежных мерзлотных ландшафтов [9].

Притрассовые исследования состояния природной среды в районе железнодорожного пути от БАМа к Эльгинскому угольному месторождению (юго-восток Якутии) позволили составить уникальный комплект карт м-ба 1:200 000. В него вошли следующие карты: геологическая, четвертичных отложений, новейших тектонических движений, распространения и мощности мерзлых пород, ландшафтная, инженерно-геологическая, глубины сезонного протаивания, гидрогеологическая и геохимическая [10].

Дана интерпретация процессов формирования синкриогенных и эпикриогенных отложений в условиях континентального литогенеза и гипергенной переработки пород. Показано, что криолитогенный грансостав и льдистость вечномерзлых грунтов образуют последовательность разномасштабных структур с определенной прочностью. Эта последовательность в сочетании с полем напряжений в массиве, вызванных нагрузкой от сооружений, предопределяет соответствующую несущую способность оснований. Выявлено взаимное соотношение структурных уровней в грунтах с условиями образования криогенных формаций и генетических типов отложений вечномерзлых пород [11].

Детально рассмотрен генезис инженерно-значимых свойств вечномерзлых грунтов. Рассмотрены напряженное состояние основания в линейно-деформируемом грунте и начальные стадии образования зон предельного равновесия под подошвой фундамента. Для первой предельной (предельно допустимой) нагрузки на основание, соотнесенной с результатами натурных испытаний фундаментов, установлено, что эта величина является более сильной функцией прочностных характеристик, чем в основном уравнении предельного сопротивления грунта. Показана возможность расчета характеристик прочности грунта по данным о предельной нагрузке на основание [12].

Изучена миграция микроэлементов в многолетнемерзлых породах под влиянием концентрационных и тепловых потенциалов. Глубина зоны миграции зависит от геологических условий и геохимических свойств элементов. Получены данные о концентрации за счет миграции широкого круга химических элементов в 2–5-метровом верхнем слое мерзлых пород. Выявлена возможность формирования на поверхности наложенных криогенных геохимических ореолов — индикаторов залегающих ниже месторождений полезных ископаемых. По геохимическим индикаторам можно определять местоположение и продуктивность погребенных россыпей золота [13].

Установлены количественные показатели формирования надмерзлотных вод за счет инфильтрации атмосферных осадков, таяния подземного льда и процессов конденсации влаги в зоне аэрации. Наличие этих вод в сезоннопротаивающем слое является фактором повышения среднегодовой температуры мерзлых пород и образования таликов.

Исследована динамика техногенной засоленности пород сезонно-талого слоя. Степень засоленности повышается в направлении фазовой границы, что способствует формированию криопэггов и перемещению их вглубь. Установлены зависимости их гидрохимического режима от условий стока и сезонов года. Антропогенные криопэги — одна из основных угроз целостности инженерной инфраструктуры в населенных пунктах Севера [14].

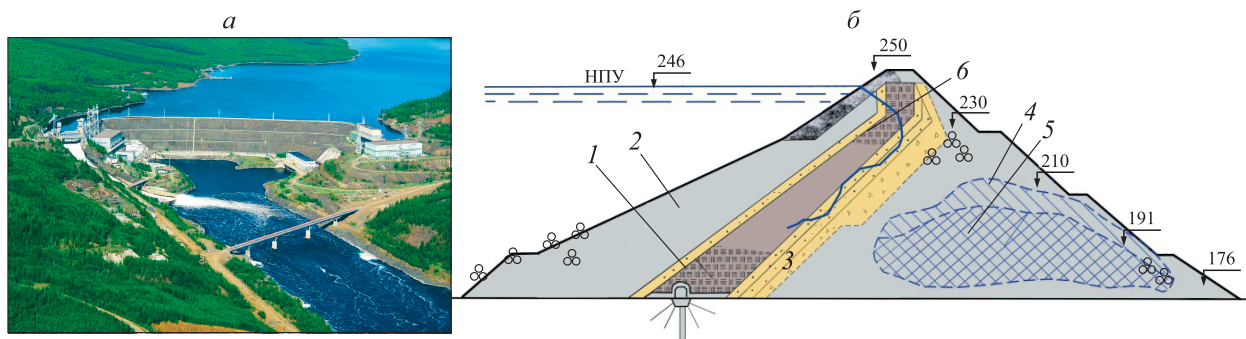
Выяснена роль фазовых переходов воды в формировании природных водообменных циклов. Выделено четыре типа водообмена: климатический, биологический, геологический и технологический. Рассчитаны энергетика и интенсивность глобального годового водообмена [15].

В результате исследования с использованием атрибутивных таблиц составлены цифровые тематические карты современного состояния мерзлотных ландшафтов Якутии — температуры грунтов, глубины деятельного слоя, льдистости отложений, глубины залегания повторно-жильных льдов на ледовом комплексе, мощности защитного слоя и распространения криогенных процессов. Проведен количественный анализ закономерностей их пространственного распределения [16].

Подготовлена к печати Мерзлотно-ландшафтная карта Республики Саха (Якутия) м-ба 1:1 500 000, которая позволила установить, что около 69 % территории представлены средне- и слабольдистыми криогенными ландшафтами, которые можно представить как относительно устойчивые зоны с наилучшими условиями для адаптации населения и социально-экономической инфраструктуры на случай катастрофических сценариев развития вечной мерзлоты в условиях потепления климата [17].

Важное место в прикладных исследованиях ИМЗ СО РАН занимает решение различных геотехнических проблем освоения криолитозоны. В последние годы получены следующие результаты:

1. Предложен новый способ складирования токсичных отходов в горном производстве. Суть его заключается в создании многосекционного хвостохранилища с круглогодичным регулированием цик-



Общий вид Вилюйской ГЭС-1 и ГЭС-2 (а) и криогенное состояние плотины (б) по результатам георадиолокационных исследований 2013 г.

1 — экран из суглинки; 2 — пригрузка из горной массы; 3 — низовая упорная призма из горной массы; 4 — зона мерзлой горной массы с частичным заполнением пор льдом; 5 — зона полного заполнения пор льдом; б — кри-
вая депрессии.

ла заполнения его емкостей и последующим замораживанием складированных отходов за счет процессов теплообмена с атмосферой в зимнее время года.

2. Разработан проект подземного хранилища жидкого топлива в толще вечномёрзлых грунтов. В проекте предусмотрена технология охлаждения топлива и создания запасов холода для летнего сезона [18].

3. Предложены новые инженерные решения по устройству малозаглубленных фундаментов зданий и методы их расчета при глубоком сезонном промерзании пучинистых грунтов [19].

4. Получены результаты натурных исследований формирования криогенно-температурного режима сооружений энергетического и водохозяйственного назначения, являющегося основой статической и фильтрационной устойчивости гидрозлов. Проанализирована роль геокриологического мониторинга и система его организации с использованием геофизических методов, позволяющих на ранних стадиях обнаруживать предпосылки начала фильтрации в криогенной среде. Предложены рекомендации по возведению и эксплуатации специальных гидротехнических сооружений — хвостохранилищ в условиях криолитозоны. Приведены инновационные разработки по возведению плотин способом скважинной гидродобычи и даны предложения по повышению устойчивости грунтовых плотин за счет использования криогенных ресурсов Земли (см. рисунок) [20].

5. Выявлены главные факторы и обоснованы параметры общей прочностной классификации мерзлых грунтов для инженерно-строительных целей. Проанализированы условия формирования прочности мерзлых грунтов в зависимости от температуры, климата и тектоники [12].

6. Проведено физическое моделирование процессов взаимодействия грунтов обратной засыпки с несущей конструкцией устоя водопропусков на гидротехнических сооружениях в условиях криолитозоны. Выявлен эффект отслоения грунта от конструктивных элементов водосбросов [21].

Таковы наиболее значительные достижения ИМЗ СО РАН за последние два десятилетия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Почти две трети территории России занимает криолитозона. Этот факт имеет большее значение при освоении северных и восточных регионов России. В их недрах содержатся гигантские запасы нефти и газа. Здесь располагаются крупнейшие угольные бассейны, месторождения алмазов, цветных и благородных металлов.

В области теоретической и региональной геокриологии ближайшими задачами ИМЗ СО РАН являются следующие:

- установление пространственно-временных закономерностей формирования теплового состояния верхних горизонтов криолитозоны под воздействием изменения климата и техногенных факторов;
- изучение современного состояния и динамики геотемпературного поля основных геоструктур и криолитозоны Северной Азии;
- разработка современной концепции закономерностей распространения, состояния и эволюции подводной (субаквальной) мерзлоты на арктическом шельфе;
- определение тенденций развития криогенных ландшафтов в условиях изменяющегося климата и техногенных воздействий;

- выявление закономерностей формирования, распространения, режима и ресурсов над- и межмерзлотных вод и особенностей их влияния на развитие различных криогенных процессов и явлений;
- выяснение роли и значения криолитозоны в формировании подземного и поверхностного речного стока;
- разработка научно-методических основ и технологий диагностики, контроля и прогноза взаимодействия природных и технических систем в криолитозоне, управления их функционированием для обеспечения технической и экологической безопасности в арктических и субарктических районах Сибири.

Среди перспективных прикладных задач института можно отметить следующие:

1. Разработка принципиально новых конструкций фундаментов и технологий строительства сооружений на мерзлых грунтах. До последнего времени повсеместно применяется так называемый первый принцип строительства на свайных фундаментах с сохранением оснований в мерзлом состоянии. Однако многолетняя практика эксплуатации зданий и сооружений в криолитозоне свидетельствует об их массовых деформациях и невозможности сохранения неизменными температуры мерзлых пород и глубины сезонного протаивания под сооружениями. Новые фундаменты должны надежно работать при изменении теплового состояния мерзлых грунтов.
2. Создание и выпуск легкой и транспортабельной аппаратуры геофизического просвечивания горных пород для установления фазовых границ и неоднородностей среды.
3. Продолжение исследований природы прочности мерзлых и оттаивающих грунтов и ее изменчивости под влиянием естественных и искусственных факторов.
4. Дальнейшее развитие нового научного направления в геокриологии — инженерной криолитологии.
5. Продолжение исследований по использованию тепловых насосов для решения проблем повышения устойчивости и надежности инженерных объектов в условиях криолитозоны за счет поглощения тепла специальными устройствами и утилизации получаемой энергии для теплоснабжения зданий. Подобные исследования могут стать основой создания надежной и экономичной инженерной инфраструктуры в условиях криолитозоны в XXI в.

Перспективы развития любой науки, безусловно, связаны с притоком в нее талантливой научной молодежи. Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН активно работает в этом направлении: имеется аспирантура, в 2010 г. была получена лицензия на право ведения образовательной деятельности по специальности 1.6.7 «инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение». Сотрудники ведут активную преподавательскую работу в Северо-Восточном федеральном университете им. М.К. Аммосова и других вузах: читают курсы лекций по различным дисциплинам, принимают участие в работе государственных экзаменационных и аттестационных комиссий, руководят учебными практиками и дипломными работами.

В ИМЗ действует докторский диссертационный совет, принимающий к защите работы по специальности «инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение» по трем отраслям науки — геолого-минералогическим, техническим и географическим. С 2001 г. успешно защитились 59 человек, из них 18 докторов и 41 кандидат наук.

Институт является соучредителем двух журналов — научного «Криосфера Земли» и научно-популярного «Наука и техника в Якутии». Активно работает Музей истории изучения вечной мерзлоты, в состав которого входит уникальная подземная научная лаборатория площадью около 470 м² для проведения длительных экспериментов с мерзлыми грунтами при естественных отрицательных температурах окружающей среды, а также объект исторической важности — Шахта Ф.Е. Шергина глубиной 116 м.

Необходимо отметить, что основным условием успешного развития отечественной геокриологии в новой социально-экономической обстановке в стране является совершенствование приборно-лабораторной базы исследований, чтобы получаемые материалы могли конкурировать с зарубежными. Главные требования к подобной базе — программируемость, полная автоматизация и автономность, работоспособность в широком диапазоне задаваемых условий. Наука не может развиваться без широкого взаимообмена идеями и обсуждения возникающих проблем, поэтому необходимо регулярное проведение научных совещаний, конференций, семинаров при соответствующем финансировании научных командировок.

Развитие науки в предыдущие годы показало, что наиболее полные, комплексные и разносторонние научные результаты решения крупных научных проблем достигаются при объединении усилий многих ученых из разных стран и организаций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балобаев В.Т., Шепелёв В.В. Космопланетарные климатические циклы // Докл. АН. — 2001. — Т. 379, № 2. — С. 247–251.
2. Балобаев В.Т., Гаврилова М.К., Скачков Ю.Б., Гаврильев П.П., Десяткин Р.В., Максимов Т.Х., Иванов Б.И., Соломонов Н.Г. Обзор состояния и тенденции изменения климата Якутии. — Якутск: Якут. филиал Изд-ва СО РАН, 2003. — 52 с.
3. Andreeva V.V., Maksimov G.T., Spector V.V., Kholodov A.L., Davydov S.P., Lobanov A.L. Cryolithological Section of Ice-Rich Sediments of the Annual Heat Circulation Layer in Post-Pyrogenic Sections of the Kolyma Lowland North-East // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. — 2020. — N 459. — С. 032051. — DOI: 10.1088/1755-1315/459/3/032051
4. Григорьев М.Н., Разумов С.О., Куницкий В.В., Спектор В.Б. Динамика берегов восточных арктических морей России: основные факторы, закономерности и тенденции // Криосфера Земли. — 2006. — Т. 10, № 4. — С. 74–94.
5. Григорьев М.Н. Криоморфогенез и литодинамика прибрежно-шельфовой зоны морей Восточной Сибири: Автореф. дис. ... д-ра геогр. наук. — Якутск, 2008 — 25 с.
6. Разумов С.О. Модель эволюции криолитозоны шельфа центрального сектора Восточно-Сибирского моря в позднем кайнозое // Евразийский Союз Ученых. — 2019. — № 9 (66). — С. 19–23. — DOI: 10.31618/ESU.24139335.-2019.2.66
7. Марченко С.С. Криолитозона Северного Тянь-Шаня: прошлое, настоящее, будущее. — Якутск: Изд-во Ин-та мерзлотоведения СО РАН, 2003. — 104 с.
8. Железняк М.Н. Геотемпературное поле и криолитозона юго-востока Сибирской платформы. — Новосибирск: Наука, 2005. — 227 с.
9. Вопросы географии Якутии. — Вып. 11: Влияние изменений климата на природные процессы криолитозоны / отв. ред. А.Н. Федоров, Р.Н. Иванова. — Якутск: СМИК-МАСТЕР, 2013. — 182 с.
10. Самсонова В.В. Изучение инженерно-геокриологических условий восточной части Станового хребта на основе дистанционных материалов // Итоги геокриологических исследований в Якутии в XX веке и перспективы их дальнейшего развития: Тез. докл. республ. конф., Якутск, 9–11 октября 2001 г. — Якутск: Изд-во Ин-та мерзлотоведения СО РАН, 2001. — С. 58–59.
11. Гурьянов И.Е. Начала инженерной криолитологии. — Якутск: Изд-во Ин-та мерзлотоведения СО РАН, 2001. — 120 с.
12. Гурьянов И.Е. Инженерная криолитология: прочность вечномёрзлых грунтов. — Новосибирск: Акад. изд-во «Гео», 2009. — 139 с.
13. Левченко Г.П., Макаров В.Н. Методы химического анализа природных вод: Метод. указания. — Якутск: Изд-во Ин-та мерзлотоведения СО РАН, 2003. — 86 с.
14. Гидрогеохимические исследования криолитозоны Центральной Якутии / отв. ред. В.В. Шепелёв. — Новосибирск: Акад. изд-во «Гео», 2014. — 189 с.
15. Шепелёв В.В. Надмерзлотные воды криолитозоны. — Новосибирск: Акад. издание «Гео», 2011. — 169 с.
16. Федоров А.Н., Шестакова А.А., Торговкин Я.И., Васильев Н.Ф., Константинов П.Я., Самсонова В.В., Калинин С.В., Башарин Н.И. Цифровое тематическое картографирование современного состояния мерзлотных ландшафтов в Якутии // Вестн. Сев.-Вост. федер. ун-та. Сер. Науки о Земле. — 2019. — № 2 (14). — С. 36–49.
17. Фёдоров А.Н., Торговкин Я.И., Шестакова А.А., Васильев Н.Ф., Калинин С.В., Башарин Н.И., Егорова Л.С. Новая «Мерзлотно-ландшафтная карта Республики Саха (Якутия)» м-ба 1:1 500 000 // Реакция криолитозоны на изменение климата: Материалы V Всерос. научн. молодеж. геокриол. форума с междунар. участием, посвященного 90-летию со дня рождения М.К. Гавриловой, Якутск, 4–20 июня 2018 г. — Якутск: Изд-во Ин-та мерзлотоведения СО РАН, 2018. — С. 104–108.
18. Кузьмин Г.П. Подземные сооружения в криолитозоне. — Якутск: Изд-во Ин-та мерзлотоведения СО РАН, 2001. — 176 с.
19. Гончаров Ю.М., Попович А.П. Поверхностные пространственные вентилируемые фундаменты в криолитозоне. — Якутск: Изд-во Ин-та мерзлотоведения СО РАН, 2013. — 344 с.
20. Грунтовые плотины в криолитозоне России / отв. ред. Д.М. Шестернев. — Новосибирск: Акад. изд-во «Гео», 2019. — 427 с.
21. Чжан Р.В. Температурный режим и устойчивость низконапорных гидроузлов в криолитозоне. — Якутск: Изд-во Ин-та мерзлотоведения СО РАН, 2002. — 208 с.

Поступила в редакцию 22.05.2024

После доработки 03.06.2024

Принята к публикации 11.07.2024