

# КРИОСФЕРА ЗЕМЛИ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Криосфера Земли, 2024, т. XXVIII, № 4, с. 62–75

<https://www.sibran.ru>

## ХРОНИКА

УДК: 551.345  
DOI: 10.15372/KZ20240406  
EDN: BTRDJX

### ВКЛАД ЯКУТСКИХ УЧЕНЫХ В РАЗВИТИЕ ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКОЙ НАУКИ (К 300-ЛЕТИЮ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК)

М.Н. Железняк, М.Н. Григорьев, А.Н. Фёдоров, В.В. Шепелёв, Р.В. Чжан,  
О.И. Алексеева\*, В.В. Куницкий

Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН,  
677010, Якутск, ул. Мерзлотная, 36, Россия

\*Автор для контакта; e-mail: o.i.alekseeva@mpi.ysn.ru

Отражены основные этапы развития науки геокриологии (мерзлотоведения) в XX–XXI веках. Приведены важнейшие результаты исследований в области мерзлотоведения по направлениям: общее, инженерное, историческое и региональное мерзлотоведение. Представлены наиболее значимые научные результаты Ордена Трудового Красного Знамени Института мерзлотоведения имени П.И. Мельникова СО РАН.

**Ключевые слова:** мерзлотоведение, криолитозона, криогенные ресурсы, арктический шельф, геотермия, гидрогеология, геохимия и экология криолитозоны.

**Ссылка для цитирования:** Железняк М.Н., Григорьев М.Н., Фёдоров А.Н., Шепелёв В.В., Чжан Р.В., Алексеева О.И., Куницкий В.В. Вклад якутских ученых в развитие геокриологической науки (к 300-летию Российской академии наук) // Криосфера Земли, 2024, т. XXVIII, № 4, с. 62–75. DOI: 10.15372/KZ20240406. EDN: BTRDJX.

### CONTRIBUTION OF YAKUTIAN RESEARCHERS TO THE ADVANCEMENT OF GEOCRYOLOGY (ON THE 300th ANNIVERSARY OF THE RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES)

M.N. Zheleznyak, M.N. Grigoriev, A.N. Fedorov, V.V. Shepelev, R.V. Zhang,  
O.I. Alekseeva\*, V.V. Kunitsky

Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
Merzlotnaya St. 36, Yakutsk, 677010 Russia

\*Corresponding author; e-mail: o.i.alekseeva@mpi.ysn.ru

The main stages in the development of geocryology in the XX–XXI centuries are highlighted. The major research achievements are presented in the fields of permafrost science, permafrost engineering, historical geocryology and regional geocryology. The most important results of research at the Melnikov Permafrost Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences are described.

**Keywords:** geocryology, permafrost, cold resources, Arctic shelf, geothermics, hydrogeology, permafrost geochemistry and ecology.

## ВВЕДЕНИЕ

2024-й год знаменует 300-летие Российской академии наук, которая подарила миру многие славные открытия и имена – Михаил Ломоносов, Дмитрий Менделеев, Николай Пирогов, Николай Лобачевский, Константин Циолковский, нобелевские лауреаты Иван Павлов, Илья Мечников, Лев Ландау, Николай Басов, Петр Капица, Жорес Алферов и др.

Мерзлотоведение (геокриология) как самостоятельная отрасль знаний сформировалась в 30-е гг. XX столетия. Это достаточно молодая наука, практическое значение которой в народном

хозяйстве было осознано лишь в конце века. Сегодня без научной продукции мерзлотоведения не обходится ни одна наука о Земле, проводящая исследования в области развития криолитозоны, и ни одна отрасль народного хозяйства, осваивающая северные территории.

В 1939 г. в Якутске начала работать комплексная экспедиция Совета по изучению производительных сил (СОПС), которую возглавил основоположник мерзлотоведения профессор М.И. Сумгин. В 1941 г. на базе этой экспедиции Постановлением СНК СССР было решено организовать

© М.Н. Железняк, М.Н. Григорьев, А.Н. Фёдоров, В.В. Шепелёв, Р.В. Чжан, О.И. Алексеева, В.В. Куницкий, 2024

Якутскую научно-исследовательскую мерзлотную станцию (ЯНИМС) Института мерзлотоведения им. В.А. Обручева (ИНМЕРО) АН СССР. В дальнейшем масштабность исследований ЯНИМС сильно возросла в 1956 г. она была преобразована в Северо-Восточное отделение ИНМЕРО, а в 1960 г. на этой базе был создан первый в Восточной Сибири и единственный в мире Институт мерзлотоведения (ИМЗ) СО АН СССР (рис. 1).

С 1960 г. и в течение последующих почти 50 лет научное и организационное руководство этим учреждением осуществлял академик П.И. Мельников. Его усилиями и трудами последующих директоров (д.т.н. Р.М. Каменского, д.т.н. Р.В. Чжана и члена-корреспондента РАН, д.г.-м.н. М.Н. Железняка) исследования якутских мерзлотоведов получили широкое признание и заслуженный авторитет в стране и за рубежом.

Сегодня Ордена Трудового Красного Знамени Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН (далее – Институт) разрабатывает национально значимое для Российской Федерации направление – комплексные геокриологические (мерзлотные) исследования [Железняк и др., 2021]. Актуальность их определяется тем, что объект этих исследований – криолитозона – занимает 65 % территории России и практически всю Восточную Сибирь. Институт имеет обширную мони-

торинговую сеть (научные станции, лаборатории, стационары) и ведет исследования в Якутии, Магаданской области, Красноярском крае и высокогорье Казахстана. Согласно Уставу, основной целью деятельности Института является проведение фундаментальных, поисковых и прикладных научных исследований в области геокриологии (мерзлотоведения), разработка научных основ рационального природопользования в криолитозоне, а также решение прикладных инженерно-геокриологических проблем и задач. В настоящее время сотрудники Института работают по шести научным проектам в соответствии с государственной “Программой фундаментальных научных исследований в Российской Федерации на долгосрочный период (2021–2030 годы)” в рамках приоритетного направления 1.5.10.7. Криосфера Земли и пространственно-временная эволюция ее вещественно-энергетических ресурсов (распоряжение Правительства Российской Федерации от 21 апреля 2022 г. № 966-р). С 2021 г. Институт является основным исполнителем технологического проекта № 2 “Устойчивость мерзлотных экосистем в условиях изменения климата и техногенных воздействий” в Научно-образовательном центре “Север: территория устойчивого развития”. В Институте работают 205 человек, из них 86 научных сотрудников, в том числе 18 докторов и 37 кандидатов наук.



Рис. 1. Сотрудники новообразованного Института мерзлотоведения СО АН СССР.

В центре второго ряда – директор института, будущий академик П.И. Мельников (Якутск, 1962 г.).

Успехи в области общего и инженерного мерзлотоведения, геотермии, гидрогеологии, геохимии и экологии криолитозоны, мерзлотного прогноза, мелиорации мерзлых грунтов, теплофизики криогенных процессов, криолитологии, мерзлотного ландшафтования и картографирования снискали мировую известность якутским мерзлотоведам.

**Якутия – стартовая площадка  
в планомерном изучении вечной мерзлоты  
(1941–1960 гг.)**

Как отмечено выше, планомерное изучение вечной мерзлоты началось на ЯНИМС ИНМЕРО в 1941 г. В 1949–1953 гг. геокриологические исследования осуществлялись по двум направлениям – инженерному и региональному [Академическая наука..., 2009]. Сотрудниками станции изучались состав, строение и физико-механические свойства многолетнемерзлых отложений, обобщался опыт строительства, в лабораторных и природных условиях проводились многочисленные эксперименты. Полученные материалы позволили сделать вывод, что в условиях сурового континентального климата Центральной Якутии принцип сохранения мерзлого состояния грунтов в основании промышленных и жилых зданий является основным. По этому принципу все здания рекомендовалось возводить с проветриваемыми подпольями или вентиляционными продухами и каналами.

Для водоснабжения г. Якутска в содружестве с Якутской геолого-поисковой буровой конторой сотрудниками станции осуществлены бурение и опробование первой в Якутии разведочно-эксплуатационной скважины на подмерзлотные воды. Результаты работ были изложены П.И. Мельниковым, А.И. Ефимовым и П.А. Соловьевым в специальном научно-техническом отчете, который получил высокую оценку специалистов и был удостоен премии по Отделению геолого-географических наук АН СССР. Эти исследования открыли эпоху широкого использования артезианских подмерзлотных вод в Якутии для питьевого и хозяйственного водоснабжения.

Региональные геокриологические исследования охватывали обширную территорию республики и включали изучение условий распространения и развития многолетнемерзлых пород, подземных вод, гигантских наледей и “ископаемых” льдов. Проводились они вместе с ведущими учеными Московского института мерзлотоведения им. В.А. Обручева АН СССР (ИНМЕРО), Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Всесоюзного геологического института, Ленинградского горного института и др.

Наиболее обстоятельные круглогодичные экспедиционные работы якутские мерзлотоведы проводили в пределах Яно-Индигирской низмен-

ности в 1952–1953 гг. Были получены новые данные о составе, строении и распространении многолетнемерзлых пород, обследованы классические обнажения подземных льдов на побережье пролива Дмитрия Лаптева в арктической зоне Якутии.

В этот же период интенсивно начало развиваться теплофизическое направление мерзлотоведения. Это было связано с необходимостью углубленного изучения процессов промерзания и оттаивания горных пород, формирования температуры и мощности криолитозоны. В эти годы началось широкое исследование тепломассообменных процессов и теплофизических свойств мерзлых пород. Закладывалась основа для создания баз данных теплофизических свойств мерзлых пород. Были разработаны уникальные установки для физического моделирования процессов промерзания–оттаивания верхних горизонтов криолитозоны, а также возможного применения геофизических методов для оконтуривания мерзлых и талых горных пород.

Большой фактический материал, полученный сотрудниками ЯНИМС при проведении экспедиционных и экспериментальных исследований, был обобщен в двухтомной монографии коллектива авторов “Мерзлая зона литосферы на территории Якутской АССР в пределах бассейна р. Лены” [Мельников и др., 1955].

**Фундаментальные научные результаты  
якутских мерзлотоведов с середины до конца  
XX века (1961–2000 гг.)**

В этот период в криолитозоне были развернуты масштабные экспедиционные работы, характеризующиеся широкой комплексностью и проводившиеся не только в различных районах Якутии, но и далеко за ее пределами. Были организованы, например, такие крупные экспедиции, как Верхоянская (1958–1959 гг.), Вилойская (1958–1960 гг.), Усть-Вилойская (1960–1963 гг.), Удоканская (1961–1965 гг.), Северная (1962–1965 гг.), Центрально-Якутская (1965–1967 гг.), Советско-Монгольская (1967–1983 гг.), Северо-Енисейская (1970–1974 гг.), Байкало-Амурская (1975–1983 гг.), Арктическая (1985–1989 гг.) и др. Огромный фактический материал, полученный в результате комплексных экспедиционных работ, лег в основу составления уникальных монографий и крупных картографических обобщений. Так, материалы Верхоянской экспедиции, проводившей исследования по программе Международного геофизического года в Восточной Якутии, были обобщены в крупной коллективной монографии “Промерзание земной поверхности и оледенение хребта Сунтар-Хаята”, вышедшей в 1964 г., а позднее использованы при написании книги “Последнее оледенение и криолитозона Южного Верхоянья” [Некрасов и др., 1973].

По материалам работ Удоканской экспедиции Института была написана и издана крупная обобщающая монография “Многолетнемерзлые горные породы Станового нагорья и Витимского плоскогорья” [1967]. Результаты работ Северной экспедиции обобщены в книге “Многолетнемерзлые породы приморской зоны Якутии” [Григорьев, 1966]. Материалы Советско-Монгольской экспедиции Института представлены на геокриологической карте Монгольской Народной Республики масштаба 1:500 000 [Геокриологическая карта..., 1971] и в фундаментальной монографии “Геокриологические условия Монгольской Народной Республики” [1974]. Огромный фактический материал, полученный полевыми отрядами Байкало-Амурской экспедиции Института, обобщен в двух крупных монографиях [Некрасов и др., 1973; Соловьева, 1976] и геокриологической карте масштаба 1:2 500 000 “Байкало-Амурская железнодорожная магистраль” [1979].

С 1958 по 1988 г. было создано более 50 научных геокриологических стационаров, в том числе около 20 – с круглогодичным циклом ежесуточных наблюдений. Огромный и уникальный фактический материал был получен на научных стационарах, где изучались процессы теплообмена в системе “литосфера–почва–атмосфера” в различных природно-ландшафтных зонах Сибири, Дальнего Востока, Средней Азии и Монголии, а также на площадках с разным типом техногенного нарушения поверхностных условий. На всех теплобалансовых стационарах Института по единой методике и в полном объеме проводились актинометрические и градиентные наблюдения за суммарной рассеянной и поглощенной радиацией, радиационным балансом, температурой и влажностью воздуха. В почвенно-грунтовом слое измерялись температура и тепловые потоки на разных глубинах, влажность и баланс влаги. Систематизация и анализ сведений, накопленных на теплобалансовых стационарах Института, были представлены в фундаментальных монографиях [Павлов, 1975, 1979], а также в других обобщающих работах и практических рекомендациях сотрудников Института.

Широкое развитие в этот период получили геотермические исследования, направленные на изучение условий формирования отрицательного температурного поля и процессов глубокого промерзания земной коры [Балобаев и др., 1977, 1983; Балобаев, 1991]. Были разработаны методика и аппаратура для измерения температуры и теплофизических свойств горных пород. Благодаря этому стало возможным проводить изучение тепловых полей в горных породах в любом труднодоступном районе.

Значительный вклад в развитие представлений об особенностях развития криолитозоны Си-

бири внесли мерзлотоведы-гидрогеологи. Именно в эти годы начали развиваться совершенно новые научные направления в изучении мерзлотно-гидрогеологических условий Сибири, выполнялись поисковые исследования, разрабатывалась методика изучения наледей и наледеобразующих источников подземных вод. В содружестве с гидрогеологами из Центральной геолого-съемочной экспедиции Якутского территориального геологического управления сотрудники лаборатории подземных вод Института приняли участие в составлении первой “Гидрогеологической карты Якутской АССР масштаба 1:2 500 000” [1967] и написании двух томов монографии “Гидрогеология СССР” [Гидрогеология..., 1970, 1972], посвященных описанию мерзлотно-гидрогеологических условий территории Якутии и Северо-Востока СССР. Были обобщены результаты многолетних уникальных гидрогеологических наблюдений на источниках подземных вод Улахан-Тарын, Булуус и Мугур-Тарын (Центральная Якутия), Тарын-Юрях, Тихон-Юрях и других (Восточная Якутия) [Шепелев, 1987], подготовлены и изданы первые практические рекомендации по использованию подземных вод Якутии для целей водоснабжения и применению греющего кабеля при эксплуатации водозаборных скважин в условиях криолитозоны.

Проводились многолетние экспедиционные, стационарные и экспериментальные гидрогеологические исследования закономерностей изменения химического состава подземных вод под воздействием процессов криогенеза. В результате обобщения и анализа полученных материалов было создано новое научное направление в геокриологии – криогидрогеохимия [Анисимова, 1981].

В 1969 г. была завершена разработка генетической классификации криогенных текстур, выделившая руководящие текстуры, характеризующие основные типы промерзания – субаквальный и субаэральный криолитогенез [Строение..., 1979; Катасонов, 2009].

Всесторонне исследовалась проблема глобального потепления климата и его воздействия на криолитозону. Велись систематические наблюдения за температурой мерзлых грунтов и их сезонным протаиванием в различных регионах и ландшафтных ассоциациях на территории Якутии и в горах Тянь-Шаня. Выявлены основные закономерности распространения, строения и температурного режима сезонномерзлых пород в различных ландшафтно-фациальных горных условиях Казахстана. Установлены основные закономерности распространения, морфологии, динамики криогенных процессов и явлений в горах Юго-Восточного Казахстана и Центральной Азии. Все криогенные явления систематизированы по главным рельефообразующим факторам. Результаты многолетних геокриологических исследова-

ний Казахстанской высокогорной геокриологической лаборатории Института получили мировое признание и использованы при составлении "Атласа снежно-ледовых ресурсов мира" [1997], геокриологической карты и монографии для Национального атласа Республики Казахстан [Горбунов, Северский, 2010].

Построена и реализована двумерная физико-математическая модель термодинамических процессов в подмерзлотной зоне при длиннопериодных колебаниях климата Земли (40 тыс. лет), являющихся причиной смены 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 при протаивании снизу может падать до нуля. При этом возникает компенсационный процесс внутрипорового испарения воды и мощный эффект всасывания. При промерзании гидростатическое давление достигает предела прочности пород, в результате чего появляются трещины всестороннего уплотнения и формируются ледяные структуры в толще мерзлых пород. Эти процессы обусловливают формирование пресных подмерзлотных вод на большой глубине.

Наиболее значимые региональные геокриологические исследования были проведены по совместным программам 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 94–14 тыс. лет. Накопление ледового комплекса закончилось 12–10 тыс. лет назад. Осадконакопление продолжалось все это время в условиях мерзлотных ландшафтов с эмбриональным оледенением в виде снежников.

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/год, а максимальная достигает 20 м/год. В результате этого объем поступающего в море осадочного материала сопоставим с его выносом крупными реками и составляет около 49 млн т в год. Многолетние полевые и аналитические исследования, проведенные в Средней и Северо-Восточной Сибири и на арктических островах, позволили оценить геологическое время накопления большей части этих пород и определить их место среди континентальных осадков последней эпохи материкового оледенения. Была выдвинута нивальная гипотеза происхождения пород ледового комплекса, основанная на том, что ископаемый лед образован из талых вод при их захоронении и замерзании в морозобойных трещинах деятельного слоя нивальных ландшафтов. Материалы проведенных исследований ледового комплекса изложены в двух монографиях [Куницкий, 1989; Григорьев, 1993]. В этих работах раскрывается специфика континентального осадочного породообразования, происходящего при взаимодействии постоянных и сезонных навеянных снежников с другими компонентами мерзлотного ландшафта (рис. 2).



Рис. 2. Изучение и опробование полигонально-жильных льдов едомной свиты (Центральная Якутия).

Изучены особенности формирования и распространения мерзлых пород в пределах Алданской антеклизы. Ведущую роль в формировании их температуры и мощности играет геолого-геоморфологическое строение региона [Железняк, 1998].

На основе изучения взаимосвязей температуры воздуха и почвогрунтов, атмосферных осадков, глубины сезонного протаивания и продуктивности биоты выполнена оценка изменчивости криоландшафтов Центральной Якутии за 60 лет. Рассчитан экокоэффициент, указывающий на предрасположенность природной среды к активизации криогенных процессов. Осуществлена ландшафтно-теплофизическая дифференциация основных природно-территориальных комплексов. На основе дешифрирования разновременных аэрофотоснимков и изучения изменчивости геокриологических условий разработана методика ретроспективного и прогнозного картографирования динамики таежных мерзлотных ландшафтов [Федоров, 1991].

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 сезоннпротаивающем слое является фактором повышения среднегодовой температуры мерзлых пород и образования таликов [Шепелев, 1995].

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.

Исследована динамика техногенной засоленности пород сезонноталого слоя. Степень засоленности повышается в направлении фазовой границы, что способствует формированию криопэгов 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.

Обобщен фактический материал по морозостойкости горных пород, развиты отдельные аспекты теории криогенного выветривания, выявлено влияние энергообменных циклов на изменение строения пород криолитозоны. Установлено воздействие криогенного выветривания на криолитологические и физико-технические свойства пород. Разработана методика прогноза и оценки влияния криогенного выветривания на изменение физико-технических свойств скальных и крупнообломочных пород.

За период с 1961 по 2000 г. сотрудниками Института было опубликовано 218 монографий,

учебных пособий, брошюр, рекомендаций, сборников научных трудов и др. [Итоги..., 2003].

В конце XX в. российскими мерзлотоведами издана брошюра “Разработка основ криогенеза (Изучение криолитозоны Земли. Прогноз)” [1988], в которой был сделан вывод о том, что результаты геокриологических исследований, полученные большими коллективами ученых и специалистов, обеспечили проектирование и строительство важнейших народнохозяйственных объектов в Восточной Сибири и определили ведущее положение отечественной геокриологии.

### Развитие мерзлотоведения (геокриологии) в XXI веке

В этот период Институт развивал исследования по фундаментальным проблемам геокриологической науки, продолжал вести интенсивное изучение геокриологических условий в районах промышленного освоения криолитозоны и участвовал в различных международных, федеральных и региональных научных программах, конкурсах РФФИ и других научных фондов [Приоритетные направления..., 2012].

Институт провел комплексные геокриологические исследования по научному сопровождению федеральных мегапроектов, реализуемых на территории Республики Саха (Якутия), таких как Южно-Якутский гидроэнергетический комплекс, Талаканское нефтегазоконденсатное месторождение, Эльконское урановое месторождение, железорудные и угольные месторождения Южной Якутии, алмазоносные рудники “Мир”, “Айхал” и “Удачный”, нефтепровод “Восточная Сибирь–Тихий океан”, газопровод “Сила Сибири” (рис. 3), железные дороги Улак–Эльга и Томмот–Кердем [Приоритетные направления..., 2012].

Проводились исследования закономерностей формирования, распространения, режима и ресурсов различных типов подземных вод криолитозоны, особенностей их использования, охраны от истощения и загрязнения.

Выяснены природные факторы, обусловливающие возникновение и существование радиационно-тепловых надмерзлотных таликов в области сплошной криолитозоны Центральной Якутии, установлена статистическая зависимость между ресурсами подземных вод межмерзлотных таликов и суммой атмосферных осадков, оценена многолетняя изменчивость дебита известных источников подземных вод, приуроченных к подножию Бестяхской террасы р. Лены, и влияние деятельности микроорганизмов на температурный и химический режим водоносных пород.

Систематизированы и обобщены материалы многолетних исследований по подземным водам криолитозоны Центральной Якутии: разработана легенда и составлен макет Гидрогеологической

карты Центральной Якутии масштаба 1:1 000 000 и написана фундаментальная монография “Подземные воды Центральной Якутии и перспективы их использования” [2003].

Наиболее активно развивались исследования криогенных процессов и явлений в Арктике, где ежегодно проводились экспедиционные работы. Сделан важный шаг в решении фундаментальной задачи о распространении и эволюции подводной мерзлоты на арктическом шельфе. Впервые получены данные о ее параметрах в западной прибрежно-шельфовой зоне моря Лаптевых. Аномально высокие, безградиентные температуры в скважинах ставят под сомнение общепринятый тезис о повсеместном распространении субаквальных многолетнемерзлых пород и их большой мощности (до 600 м) на шельфе в этом регионе [Grigoriev *et al.*, 2003].

Стационарные наблюдения за антропогенными нарушениями в криолитозоне позволили выяснить особенности восстановления криогенных ландшафтов в начальных сукцессионных стадиях. Оценены криоэкологические особенности агроландшафтов Центральной Якутии. Разработана методика их криоэкологического районирования и определены критерии активизации криогенных процессов при антропогенных воздействиях и изменениях современного климата. Установлены основные закономерности взаимосвязей вечной мерзлоты и климата холодных регионов Земли. Составлена серия прогнозных карт изменения климата [Гаврильев, 2001].

Выполнена палеореконструкция пространственной и временной изменчивости мощности многолетнемерзлой толщи в различных геоморфологических областях юго-восточной части Сибирской платформы в период от конца среднего неоплейстоцена до нашего времени. Выяснено, что 125 тыс. лет назад многолетнемерзлые породы занимали менее 58 % исследуемой территории.

На основании геотермических исследований на опорных площадях юго-востока Сибирской платформы выполнены расчеты температуры пород до глубины 3000 м и построена серия мерзлотно-геотермических разрезов. Осуществлены сбор и систематизация данных по теплофизическим свойствам горных пород центральной и северной областей Сибирской платформы вдоль геотемпературных разрезов через плато Пutorана – Долганская – Ыраас и простирации Енисей-Хатангского прогиба. В результате этих работ выявлены региональные и локальные особенности геокриологических условий исследуемых территорий. Составлены геокриологические, мерзлотно-ландшафтные и экологические карты разного масштаба, созданы каталоги и базы геокриологических данных, являющиеся основой проектных решений

и прогноза устойчивости комплексов сооружений [Железняк, 2005].

На основе исследований процессов формирования структуры и свойств многолетнемерзлых грунтов под воздействием температурных, климатических и тектонических факторов разработаны начала инженерной криолитологии – науки на стыке литологии и инженерной геологии, изучающей законы формирования, преобразования, строения и механических свойств многолетнемерзлых пород, а также факторы и условия, предопределяющие экстремальные характеристики этих свойств [Гурьянов, 2009].

В работах В.Р. Алексеева решены многие вопросы гидрологии суши, геоботаники, гляциологии, мерзлотоведения, геоэкологии, перигляциальной морфологии, истории географических исследований Сибири и Дальнего Востока. Основные труды посвящены исследованию особо опасных криогенных явлений – снежных лавин, наледей, вечной и сезонной мерзлоты [Алексеев, 2004; Алексеев, Чжан, 2011].

Теоретически доказано и экспериментально, в натурных условиях г. Якутска, подтверждено использование криогенных ресурсов Земли в инженерной практике. Была разработана и запатентована новая технология управления температурным режимом подземных сооружений, построенных в слое годовых теплооборотов в криолитозоне. Она основана на сдвиге фаз температурных колебаний в мерзлых грунтах. Впервые в мировой практике построено и эксплуатируется криохранилище семян растений (рис. 4). Установлена возможность практического использования теплоты фазового перехода воды для обогрева в зимнее время некоторых видов производственных помещений [Кузьмин, 2002].

Большой объем натурных исследований проведен в области гидротехнического строительства в криолитозоне по формированию тепловлажностного состояния грунтовых плотин и их оснований [Каменский, 1977; Оловин, Медведев, 1980; Оловин, 1993; Чжан, 2000, 2002], а также теплового и механического взаимодействия водохранилищ с окружающей средой [Константинов, Суходровский, 1977]. Эти исследования вскрыли сложность процессов, происходящих в сооружениях при их эксплуатации. Они показали, что в плотинах, отсыпанных из каменной наброски, периодически происходит смена теплового состояния (промерзание–оттаивание) грунтов тела и основания, т. е. сооружение пребывает в неустановившемся тепловлажностном режиме. Полученные данные легли в основу первых прогнозистических моделей. Выполнено научное обобщение результатов проектных, опытно-конструкторских, технологических и научно-исследовательских работ, материалов изы-



Рис. 3. Сотрудники Института – участники экспедиции “Сила Сибири” (2019 г.).



Рис. 4. Группа сотрудников Института мерзлотоведения СО РАН на открытии Федерального криохранилища семян растений (Якутск, 2012 г.).

сканий, а также опыта строительства и эксплуатации гидросооружений в Якутии и на сопредельных территориях. Обобщен опыт строительства и эксплуатации ряда гидроузлов в Якутии с плотинами мерзлого и талого типов в криолитозоне. В 2019 г. издана монография “Грунтовые плотины в криолитозоне России” [2019]. В монографии, помимо обобщения опыта, приведены собственные результаты натурных исследований формирования криогенно-температурного режима гидроузлов энергетического и водохозяйственного назначения, являющегося основой статической и фильтрационной устойчивости гидротехнических сооружений, показана роль геокриологического мониторинга и система его организации с использованием геофизических методов, дано современное представление о работе грунтовых плотин в условиях меняющегося климата на Земле.

Изучены особенности структуры геоэлектрических, сейсмических, температурных разрезов и динамики основных параметров, отражающих взаимодействие инженерных сооружений с вмещающей геокриологической средой. Внедрены современные высокотехнологичные автоматизированные технические средства наземных и скважинных геофизических исследований, в том числе геоэлектрическая томография, межскважинное радиоволновое просвечивание, высокоточные логгерные температурные измерения и прочее, позволяющие значительно повысить производительность и информативность геофизических методов для контроля за устойчивостью гидротехнических сооружений в криолитозоне [Основные итоги..., 2022].

Многолетние геокриологические исследования, выполненные якутскими учеными в криолитозоне России – в городах Мурманске, Норильске, Красноярске, Игарке и Якутске, позволили обобщить и сформулировать наиболее значимые научные выводы и практические рекомендации [Гончаров, 1988, 2016; Растворов и др., 2009].

Разработаны теоретические основы конструирования приборов нового поколения для измерения температур поверхности инженерных выработок (скважин, шахт, штолен). Предложена методика экспериментальных лабораторных исследований криогенного пучения крупнодисперсных грунтовых систем. Выполнено инженерно-геокриологическое районирование криолитозоны Южного Забайкалья. Разработаны научно-методические основы исследований теплового и механического взаимодействия оснований и фундаментов при деградации криолитозоны. Установлены основные закономерности термомеханического взаимодействия свайных фундаментов с оттаивающими многолетнемерзлыми грунтами.

Институт принял активное участие в обсуждении и работе над Законом “Об охране вечной мерз-

лоты в Республике Саха (Якутия)”, принятым 22 мая 2018 г. № 2006-З N 1571-В. Закон представляет современную нормативную правовую базу в области охраны окружающей среды и природопользования в виде 21 статьи закона, регламентирующей различные аспекты охраны вечной мерзлоты. К сфере строительства относятся статьи закона: 15. Мониторинг вечной мерзлоты – комплексные наблюдения за состоянием многолетнемерзлых пород, происходящими в них процессами и явлениями. 16. Геотехнический мониторинг вечной мерзлоты – комплекс работ, основанный на натурных наблюдениях за состоянием грунтов основания (температурный режим), гидрогеологическим режимом, перемещением конструкций фундаментов вновь возводимых, реконструируемых и эксплуатируемых сооружений [Алексеева, 2022].

За период с 2001 по 2023 г. сотрудниками Института было подготовлено и опубликовано 210 монографий, учебных пособий, брошюр, рекомендаций, сборников научных трудов и др.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выдающиеся достижения якутских мерзлотоведов в XX – начале XXI в. заключаются в следующем.

1. Основаны и развиты новые научные направления на стыке геокриологии и других наук:

- криогидрохимия – наука об особенностях формирования химического состава подземных вод криолитозоны, зависимости их гидрохимического режима от величины промерзания, условий водообмена, а также от литологического состава слагающих пород, геоморфологии местности и других факторов;

- криолитология – специальный раздел литологии, призванный изучать состав и криогенное строение мерзлых толщ осадочных пород в зависимости от обстановки их накопления и промерзания и устанавливать закономерности распределения льдистости в осадочных отложениях на основе мерзлотно-фациального анализа. Сформулированы основы инженерной криолитологии;

- геотермия мерзлой зоны литосферы – научное направление, в рамках которого изучаются основные природные факторы, приводящие к возникновению и развитию мерзлых пород, а также выявляется связь мощности криолитозоны с геотектоникой, геодинамикой и тепловым состоянием глубоких недр Земли;

- термогеология мерзлых грунтов – новое направление в геокриологии, изучающее термогеологические свойства мерзлых грунтов и льда на основании исследований их структурных преобразований, физико-механических свойств и т. д.;

- теплофизика ландшафтов – научное направление, раскрывающее взаимосвязь между

отдельными компонентами ландшафта, в том числе мерзлотного, и изучающее ландшафтные комплексы методами теплофизики;

– ландшафтное мерзлотоведение, основными задачами которого являются изучение закономерностей пространственной дифференциации и динамики мерзлотных ландшафтов, разработка критериев в оценке их устойчивости и прогноза развития;

– теория тепло- и массообмена в мерзлых, протаивающих и промерзающих грунтах, формирующего структуру, свойства и динамику деятельного слоя;

– теория физико-химических процессов, протекающих в природной среде при участии твердой фазы воды (льда) и незамерзших жидких пленок воды.

2. Проведены фундаментальные гидрогеологические исследования криолитозоны: открыт Якутский артезианский бассейн подмерзлотных вод; составлены и изданы: Карта мерзлотно-гидрогеологического районирования Восточной Сибири, Гидрогеологическая карта Якутии, Карта надмерзлотных вод Якутии, фундаментальные монографии об особенностях гидрогеологических условий криолитозоны.

3. Исследованы условия формирования, распространения и разрушения современного ледового комплекса – поверхностной толщи грунтов с избыточным содержанием льда в виде жильных образований.

4. Выполнено комплексное геокриологическое обоснование “строек века” (зоны БАМ, АЯМ, месторождений алмазов, золота, олова и др.). Разработаны рекомендации по уменьшению последствий техногенного преобразования северных геосистем.

5. Установлены основные закономерности и количественные показатели физико-механических свойств мерзлых грунтов при изменении условий среды: разработана классификация основных разновидностей грунтов Якутии по фазовому составу воды в зависимости от температуры; предложены формулы для определения физических характеристик мерзлых грунтов; определены расчетные характеристики несущей способности свайных фундаментов.

6. Разработаны следующие способы и методы строительства зданий и сооружений в условиях криолитозоны, реализованные на практике:

– свайные фундаменты с проветриваемым подпольем;

– свайные фундаменты с “холодными сваями” – железобетонными сваями со встроенным в них охлаждающими устройствами;

– свайные фундаменты с буронабивными сваями;

– поверхность фундаменты (фундаменты-оболочки, фундаменты структурного типа и плоские фундаментные плиты с сотовым заполнителем);

– подземный способ прокладки трубопроводов;

– метод строительства подземных емкостей (аккумуляторы холода, емкости для хранения различных продуктов, газов и ГСМ);

– метод обеспечения фильтрационной и статической устойчивости мерзлых плотин;

– метод сохранения мерзлых оснований инженерных сооружений с помощью сезонно-действующих охлаждающих систем;

– метод сохранения мерзлых оснований инженерных сооружений за счет использования тепловых насосов.

7. Выявлены основные пространственные и временные закономерности взаимосвязи “климат–вечная мерзлота”: впервые произведена детальная типизация этих связей в зависимости от ранга климатообразования (от космических до внутриземных); определены особенности распределения климата и вечной мерзлоты на Евразийском и Североамериканском континентах. Сделан прогноз изменения климатических условий Якутии до середины XXI в. и реакции многолетнемерзлых пород на возможное изменение климата.

8. Осуществлен многолетний мониторинг динамики термоабразионных разрушений морских берегов арктических низменностей, сложенных ледовым комплексом. Сделан прогноз скорости отступания берегов арктических морей.

Учитывая чрезвычайную важность оценки реакции криолитозоны на происходящее глобальное потепление климата, стратегическими целями деятельности Института являются следующие приоритетные направления развития геокриологических исследований.

1. *Оценка динамики криолитозоны в различных природных и природно-техногенных геосистемах.*

Для успешного развития исследований по данному научному направлению важным является создание мониторинговой сети как информационной геокриологической системы, с повышением точности и информативности получаемых данных, использованием дистанционной системы наблюдений. Наиболее актуальными вопросами являются исследование эволюции субаквальной криолитозоны на шельфе арктических морей Якутии, изучение тенденций и величины изменения параметров многолетнемерзлых толщ на урбанизированных территориях, а также в районах строительства крупных линейных (нефте- и газопроводы, автомобильные и железные дороги) и гидротехнических сооружений.

## 2. Геотермическое, геотеплофизическое и геохимическое состояние криолитозоны Сибири.

Исследования по этому научному направлению включают дальнейшую разработку теории теплового состояния многолетнемерзлых толщ, моделирование геотеплофизических процессов в криолитозоне, совершенствование методов палеореконструкции температуры и мощности многолетнего промерзания недр, изучение закономерностей миграции и концентрации химических элементов в криолитозоне.

## 3. Изучение основных тенденций трансформации криогенных ландшафтов в условиях меняющегося климата и техногенных воздействий.

Данное научное направление должно включать разработку методов прогнозного моделирования развития криогенных ландшафтов, количественную оценку последствий их преобразования при различных сценариях изменения климата, определение критериев устойчивости к климатическим колебаниям и техногенным воздействиям.

## 4. Изучение закономерностей и тенденций изменения режима и ресурсов различных типов подземных вод криолитозоны, особенностей их использования и охраны.

Разработка этого научного направления должна строиться на основе более углубленного изучения взаимодействия подземных вод с многолетнемерзлыми породами и поверхностными водами. К важным вопросам следует отнести совершенствование научно-методических основ мерзлотно-гидрогеологического картирования и районирования разного масштаба и назначения.

## 5. Разработка теории надежности эксплуатации геотехнических систем в криолитозоне.

Исследования по этому очень важному и актуальному научному направлению должны включать решение таких вопросов, как разработка новой теории трансформации вещественного состава, строения и свойств горных пород криолитозоны с учетом изменений климата и техногенных нагрузок, совершенствование методов определения прочностных характеристик мерзлых грунтов, создание новых технологий строительства и конструкций фундаментов, совершенствование методов инженерной защиты территорий и отдельных сооружений от развития негативных процессов и явлений (подтопление надмерзлотными водами, пучение, термокарст и т. д.).

## Литература

**Академическая** наука в Якутии (1949–2009 гг.) / Гл. ред. А.Ф. Сафонов, отв. ред. В.В. Шепелёв. Новосибирск, Акад. изд-во “Гео”, 2009, 219 с.

**Алексеев В.Р.** Инженерная геокриология, гляциология, ледотехника: фундаментальные источники информации на русском языке. Якутск, ИМЗ СО РАН, 2004, 186 с.

**Алексеев В.Р.** Криогенные строительные материалы. Формирование понятия, классификация, состояние изученно-

сти / В.Р. Алексеев, Р.В. Чжан. Якутск, Изд-во ИМЗ СО РАН, 2011, 66 с.

**Алексеева О.И.** Инженерные сооружения на мерзлых основаниях. Якутск, ИМЗ СО РАН, 2022, 183 с.

**Анисимова Н.П.** Криогидрохимические особенности мерзлой зоны. Новосибирск, Наука, 1981, 153 с.

**Атлас** снежно-ледовых ресурсов мира / Гл. ред. В.М. Котляров. М., НПП Картография, 1997, 392 с.

**Байкало-Амурская** железнодорожная магистраль: геокриологическая карта / Отв. ред. И.А. Некрасов. М., ГУГК, 1979, 2 л.

**Балобаев В.Т.** Руководство по градуировке терморезисторов и использование их при геотермических измерениях / В.Т. Балобаев, Б.В. Володько, В.Н. Девяткин, А.И. Левченко. Якутск, ИМЗ СО АН СССР, 1977, 77 с.

**Балобаев В.Т.** Теплофизические исследования криолитозоны Сибири / В.Т. Балобаев, А.В. Павлов, Г.З. Перльштейн. Новосибирск, Наука, 1983, 215 с.

**Балобаев В.Т.** Геотермия мерзлой зоны литосферы Севера Азии. Новосибирск, Наука, 1991, 191 с.

**Гаврильев П.П.** Мерзлотно-экологические особенности таежных агроландшафтов Центральной Якутии / П.П. Гаврильев, И.С. Угаров, П.В. Ефремов. Якутск, Изд-во ИМЗ СО РАН, 2001, 196 с.

**Геокриологическая** карта Монгольской Народной Республики. М-б 1:500 000 / Сост. Г.Ф. Гравис и др. Якутск, 1971, 8 л.

**Геокриологические** условия Монгольской Народной Республики / Сост. Г.Ф. Гравис и др. М., Наука, 1974, 200 с.

**Гидрогеологическая** карта Якутской АССР. М-б 1: 2 500 000 / Сост. Н.Н. Индолева и др. Якутск, ИМЗ СО АН СССР, Якут. геол. упр-ние МГ СССР, 1967, 4 л.

**Гидрогеология** СССР. Т. XX. Якутская АССР / Под ред. О.Н. Толстихина и др. М., Недра, 1970, 383 с.

**Гидрогеология** СССР. Т. XXVI. Северо-Восток СССР / Ред. В.Е. Глотов и др. М., Недра, 1972, 297 с.

**Гончаров Ю.М.** Эффективные конструкции фундаментов на вечномерзлых грунтах. Новосибирск, Наука, 1988, 192 с.

**Гончаров Ю.М.** Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. Якутск, Изд-во ИМЗ СО РАН, 2016, 406 с.

**Горбунов А.П., Северский А.В.** Геокриологическая карта 1:5 000 000 // Национальный атлас Республики Казахстан. Т. 1. Природные условия и ресурсы. Алматы, 2010, с. 92–93.

**Григорьев М.Н.** Криоморфогенез устьевой области р. Лены. Якутск, Изд-во ИМЗ СО РАН, 1993, 182 с.

**Григорьев Н.Ф.** Многолетнемерзлые породы приморской зоны Якутии. М., Наука, 1966, 180 с.

**Грунтовые** плотины в криолитозоне России / Р.В. Чжан, С.А. Великин, Г.И. Кузнецов, Н.В. Крук. Новосибирск, Акад. изд-во “Гео”, 2019, 427 с.

**Гурьянов И.Е.** Инженерная криолитология: прочность вечномерзлых грунтов. Новосибирск, Акад. изд-во “Гео”, 2009, 139 с.

**Железняк М.Н.** Геотермические условия криолитозоны западной части Алданской антеклизы. Якутск, Изд-во СО РАН, 1998, 92 с.

**Железняк М.Н.** Геотемпературное поле и криолитозона юго-востока Сибирской платформы. Новосибирск, Наука, 2005, 227 с.

**Железняк М.Н., Чжан Р.В., Шепелёв В.В. и др.** Институт мерзлотоведения имени П.И. Мельникова СО РАН на ру-

безе 60-летия со дня образования // Криосфера Земли, 2021, т. XXV, № 1, с. 55–68.

**Итоги геокриологических исследований в Якутии в 20 веке и перспективы их дальнейшего развития /** Отв. ред. Р.М. Каменский, В.В. Шепелёв. Якутск, Изд-во ИМЗ СО РАН, 2003, 204 с.

**Каменский Р.М.** Термический режим плотины и водохранилища Вилойской ГЭС. Якутск, ИМЗ СО АН СССР, 1977, 92 с.

**Катасонов Е.М.** Литология мерзлых четвертичных отложений (криолитология) Янсской приморской низменности. М., ПНИИС; ИМЗ СО РАН, 2009, 176 с.

**Константинов И.П., Сухоровский В.Л.** О формировании берегов в области вечной мерзлоты (на примере Вилойского водохранилища) // Изучение берегов водохранилищ Сибири. Новосибирск, Наука, 1977, с. 62–72.

**Кузьмин Г.П.** Подземные сооружения в криолитозоне. Новосибирск, Наука, 2002, 176 с.

**Куницкий В.В.** Криолитология низовья Лены. Якутск, ИМЗ СО АН СССР, 1989, 163 с.

**Мельников П.И., Ефимов А.И., Соловьев П.А. и др.** Мерзлая зона литосферы на территории Якутской АССР в пределах бассейна р. Лены [Рукопись] // Фонды ИМЗ СО РАН. Якутск, 1955, № 813, 853 с.

**Многолетнемерзлые** горные породы Станового нагорья и Витимского плоскогорья / И.А. Некрасов, С.И. Заболотник, И.В. Клиновский, Ю.Г. Шасткевич. М., Наука, 1967, 168 с.

**Некрасов И.А.** Последнее оледенение и криолитозона Южного Верхоянья / И.А. Некрасов, Е.В. Максимов, И.В. Клиновский. Якутск, Кн. изд-во, 1973, 150 с.

**Оловин Б.А.** Динамика температурного поля плотины Вилойской ГЭС / Б.А. Оловин, Б.А. Медведев. Новосибирск, Наука, 1980, 48 с.

**Оловин Б.А.** Фильтрационная проницаемость вечномерзлых грунтов. Новосибирск, Наука, 1993, 257 с.

**Основные** итоги деятельности Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН за 2021 год: Отчет о науч. и науч.-организац. работе Института мерзлотоведения СО РАН / Отв. ред. В.В. Шепелёв, М.Н. Железняк; сост. О.И. Алексеева, А.А. Куть. Якутск, Изд-во ИМЗ СО РАН, 2022, 212 с.

**Павлов А.В.** Теплообмен почвы с атмосферой в северных и умеренных широтах территории. Якутск, Кн. изд-во, 1975, 302 с.

**Павлов А.В.** Теплофизика ландшафтов. Новосибирск, Наука, 1979, 285 с.

**Подземные** воды Центральной Якутии и перспективы их использования / В.Т. Балобаев, Л.Д. Иванова, Н.М. Никитина и др. Новосибирск, Изд-во СО РАН, фил. "Гео", 2003, 137 с.

**Приоритетные** направления исследований Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН на 2012–2022 гг.: брошюра, подготовленная ученым советом. Якутск, Изд-во ИМЗ СО РАН, 2012, 18 с.

**Разработка** основ криогенеза (Изучение криолитозоны Земли. Прогноз) / Совет по криологии Земли. Якутск, ИМЗ СО АН СССР, 1988, 23 с.

**Растегаев И.К.** Свайное фундаментостроение в криолитозоне / И.К. Растегаев, Д.С. Бакшеев, Р.М. Каменский. Новосибирск, Акад. изд-во "Гео", 2009, 279 с.

**Соловьева Л.Н.** Морфология криолитозоны Саяно-Байкальской области (на примере Бурятской АССР). Новосибирск, Наука, 1976, 126 с.

**Строение** и абсолютная геохронология аласных отложений Центральной Якутии / Е.М. Катасонов, М.С. Иванов, Г.Г. Пудов и др. Новосибирск, Наука, 1979, 95 с.

**Фёдоров А.Н.** Мерзлотные ландшафты Якутии: методика выявления и вопросы картографирования. Якутск, ИМЗ СО РАН, 1991, 140 с.

**Чжан Р.В.** Проектирование, строительство и эксплуатация гидротехнических сооружений низкого напора в криолитозоне (на примере Якутии). Якутск, Изд-во ИМЗ СО РАН, 2000, 160 с.

**Чжан Р.В.** Температурный режим и устойчивость низкогонапорных гидроузлов и грунтовых каналов в криолитозоне. Якутск, Изд-во ИМЗ СО РАН, 2002, 207 с.

**Шепелёв В.В.** Родниковые воды Якутии. Якутск, Кн. изд-во, 1987, 128 с.

**Шепелёв В.В.** Надмерзлотные воды. Особенности формирования и распространения. Якутск, ИМЗ СО РАН, 1995, 48 с.

**Grigoriev M.N., Rachold V., Schirrmeister L.** Russian–German cooperation SYSTEM LAPTEV SEA, the expedition Lena 2002 // Rep. Polar and Marine Res. Bremerhaven, Germany, 2003, vol. 466, 341 p.

## References

Akademicheskaya nauka v Yakutii (1949–2009 gg.) [Academic science in Yakutia]. Ed. by A.F. Safronov. Novosibirsk, Acad. Publ. House "Geo", 2009, 219 p. (in Russian).

Alekseev V.R. Inzhenernaya geokriologiya, glyaciologiya, ledotekhnika: fundamental'nye istochniki informatsii na russkom yazyke [Frozen ground engineering, glaciology and ice engineering: Fundamental information sources in Russian]. Yakutsk, IMZ SO RAN, 2004, 186 p. (in Russian).

Alekseev V.R., Zhang R.V. Kriogennye stroitel'nye materialy. Formirovanie ponyatiya, klassifikatsiya, sostoyanie izuchenosti [Cryogenic building materials: Concept development, classification, state of art]. Yakutsk, IMZ SO RAN, 2011, 66 p. (in Russian).

Alekseeva O.I. Inzhenernye sooruzheniya na merzlykh osnovaniyakh [Engineering structures on frozen ground]. Yakutsk, IMZ SO RAN, 2022, 183 p. (in Russian).

Anisimova N.P. Kriodirogeohimicheskie osobennosti merzloy zony [Cryohydrogeochemistry of the frozen zone]. Novosibirsk, Nauka, 1981, 153 p. (in Russian).

Atlas snezhno-ledovykh resursov mira [The Atlas of world's snow and ice resources]. Ed. by V.M. Kotlyakov. Moscow, NPP Kartografia, 1997, 392 p. (in Russian).

Baikalo-Amurskaya zheleznodorozhnaya magistral': geokriologicheskaya karta [The Baykal-Amur Railway: Geocryological Map]. Ed. by I.A. Nekrasov. Moscow, GUGK, 1979, 2 sheets (in Russian).

Balobaev V.T., Volod'ko B.V., Devyatkin V.N., Levchenko A.I. Rukovodstvo po graduirovke termorezistorov i ispol'zovaniye ikh pri geotermicheskikh izmereniyakh [Manual on thermistor calibration and use in geothermal measurements]. Yakutsk, IMZ SO AN SSSR, 1977, 77 p. (in Russian).

Balobaev V.T., Pavlov A.V., Perl'shteyn G.Z. Teplofizicheskie issledovaniya kriolitozony Sibiri [Thermophysical investigations of Siberian permafrost]. Novosibirsk, Nauka, 1983, 215 p. (in Russian).

Balobaev V.T. Geotermiya merzloy zony litosfery Severa Azii [Geothermics of the frozen zone of the lithosphere in northern Asia]. Novosibirsk, Nauka, 1991, 191 p. (in Russian).

- Gavril'ev P.P., Ugarov I.S., Efremov P.V. Merzlotno-ekologicheskie osobennosti taeznykh agrolandshaftov Central'noy Yakutii [Permafrost-ecological characteristics of taiga agro-landscapes]. Yakutsk, IMZ SO RAN, 2001, 196 p. (in Russian).

Geokriologicheskaya karta Mongol'skoy Narodnoy Respubliki. M-b 1:500 000 [Geocryological map of the People's Republic of Mongolia, scale 1:500,000]. Compiled by G.F. Gravis et al. Yakutsk, 1971, 8 sheets (in Russian).

Geokriologicheskie usloviya Mongol'skoy Narodnoy Respubliki [Geocryological conditions in the People's Republic of Mongolia]. Compiled by G.F. Gravis et al. Moscow, Nauka, 1974, 200 p. (in Russian).

Gidrogeologicheskaya karta Yakutskoy ASSR. M-b 1:500 000 [Hydrogeological map of the Yakutian ASSR]. Compiled by N.N. Indoleva et al. Yakutsk, IMZ SO AN SSSR, Yakut. Geol. Upravlenie MG SSSR, 1967, 4 sheets (in Russian).

Gidrogeologiya SSSR. Tom XX. Yakutskaya ASSR [Hydrogeology of the USSR. Vol. XX. Yakutian ASSR]. Ed. by O.N. Tolstikhin et al. Moscow, Nedra, 1970, 383 p. (in Russian).

Gidrogeologiya SSSR. Tom XXVI. Severo-Vostok SSSR [Hydrogeology of the USSR. Vol. XXVI. North-East of the USSR]. Ed. by V.E. Glotov et al. Moscow, Nedra, 1972, 297 p. (in Russian).

Goncharov Yu.M. Effektivnye konstrukcii fundamentov na vechnomerzlykh gruntah [Effective foundation designs for permafrost areas]. Novosibirsk, Nauka, 1988, 192 p. (in Russian).

Goncharov Yu.M. Osnovaniya i fundamenty na vechnomerzlykh gruntah [Foundations and supporting soils in permafrost]. Yakutsk, IMZ SO RAN, 2016, 406 p. (in Russian).

Gorbunov A.P., Severskiy A.V. Geokriologicheskaya karta 1:5 000 000 [1:5,000,000 scale geocryological map]. In: The National Atlas of the Republic of Kazakhstan. Vol. 1. Environmental conditions and resources. Almaty, 2010, p. 92–93 (in Russian).

Grigoriev M.N. Kriomorphogenet ust'evoy oblasti r. Leny [Cryomorphogenesis of the Lena River mouth area]. Yakutsk, IMZ SO RAN, 1993, 182 p. (in Russian).

Grigoriev N.F. Mnogoletnemerzlye porody primorskoy zony Yakutii [Permafrost in the coastal areas of Yakutia]. Moscow, Nauka, 1966, 180 p. (in Russian).

Zhang R.V., Velikin S.A., Kuznetsov G.I., Kruk N.V. Gruntovye plotiny v kriolitozone Rossii [Embankment dams in the Russian permafrost zone]. Novosibirsk, Acad. Publ. House "Geo", 2019, 427 p. (in Russian).

Guryanov I.E. Inzhenernaya kriolitologiya: prochnost' vechnomerzlykh gruntov [Engineering cryolithology: Strength of perennially frozen soils]. Novosibirsk, Acad. Publ. House "Geo", 2009, 139 p. (in Russian).

Zheleznyak M.N. Geotermicheskie usloviya kriolitozony zapadnoy chasti Aldanskoy anteklizy [Geothermal conditions of permafrost in the western portion of the Aldan Basin]. Yakutsk, Izd-vo SO RAN, 1998, 92 p. (in Russian).

Zheleznyak M.N. Geotemperaturnoe pole i kriolitozona yugovostoka Sibirskoy platformy [The ground temperature field and permafrost in the south-eastern part of the Siberian Platform]. Novosibirsk, Nauka, 2005, 227 p. (in Russian).

Zheleznyak M.N., Zhang R.V., Shepelev V.V., Grigoriev M.N., Fedorov A.N., Alekseeva O.I. The Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences at the turn of its 60th anniversary. Earth's Cryosphere, 2021, vol. XXV, No. 1, p. 48–60.

Itogi geokriologicheskikh issledovaniy v Yakutii v 20 veke i perspektivy ikh dal'neyshego razvitiya [Results of geocryological investigations in Yakutia in the 20th century and future prospects]. Ed. by R.M. Kamenskiy, V.V. Shepelev. Yakutsk, IMZ SO RAN, 2003, 204 p. (in Russian).

Kamenskiy R.M. Termicheskiy rezhim plotiny i vodohranilishcha Vilyuyskoy GES [Thermal regime of the dam and water reservoir, Vilyui Hydro]. Yakutsk, IMZ SO AN SSSR, 1977, 92 p. (in Russian).

Katasonov E.M. Litologiya merzlykh chetvertichnykh otlozheniy (kriolitologiya) Yanskoy primorskoy nizmennosti [Lithology of frozen Quaternary deposits (cryolithology) in the Yana coastal lowland]. Moscow, OAO PNIIIS, IMZ SO RAN, 2009, 176 p. (in Russian).

Konstantinov I.P., Sukhodrovskiy V.L. On shoreline development in permafrost regions (a case study of the Vilyui Reservoir). In: Investigations of Siberian reservoir shores. Novosibirsk, Nauka, 1977, p. 62–72 (in Russian).

Kuz'min G.P. Podzemnye sooruzheniya v kriolitozone [Underground structures in permafrost]. Novosibirsk, Nauka, 2002, 176 p. (in Russian).

Kunitskiy V.V. Kriolitologiya nizov'ya Leny [Cryolithology of the lower Lena area]. Yakutsk, IMZ SO AN SSSR, 1989, 163 p. (in Russian).

Mel'nikov P.I., Efimov A.I., Solov'ev P.A. et al. Merzlaya zona litosfery na territorii Yakutskoy ASSR v predelakh basseyna r. Leny [The frozen zone of the lithosphere in Yakutian ASSR within the Lena River basin. Manuscript: unpublished materials]. Yakutsk, IMZ SO AN SSSR, 1955, No. 813, 853 p. (in Russian).

Nekrasov I.A., Zabolotnik S.I., Klimovskiy I.V., Shastkevich Yu.G. Mnogoletnemerzlye porody Stanovogo nagor'ya i Vitimskogo pleskogor'ya [Permafrost on the Stanovoy Upland and Vitim Plateau]. Moscow, Nauka, 1967, 168 p. (in Russian).

Nekrasov I.A., Maksimov E.V., Klimovskiy I.V. Poslednee oledenie i kriolitozona Yuzhnogo Verhoyan'ya [Last glaciation and permafrost in the southern Verkhoyansk Range]. Yakutsk, Kn. izd-vo, 1973, 150 p. (in Russian).

Olovin B.A., Medvedev B.A. Dinamika temperaturnogo polya plotiny Vilyuyskoy GES [Temperature field dynamics in the Vilyui Hydro dam]. Novosibirsk, Nauka, 1980, 48 p. (in Russian).

Olovin B.A. Fil'tratsionnaya pronaitsaemost' vechnomerzlykh gruntov [Permeability of permafrost]. Novosibirsk, Nauka, 1993, 257 p. (in Russian).

Osnovnye itogi deyatel'nosti Instituta merzlotovedeniya im. P.I. Mel'nikova SB RAS za 2021 god. Otchet o nauchnoy i nauchno-organizatsionnoy rabote Instituta merzlotovedeniya im. P.I. Mel'nikova SB RAS [Main results of the Melnikov Permafrost Institute SB RAS in 2021. Annual Report]. Ed. by V.V. Shepelev, M.N. Zheleznyak. Yakutsk, IMZ SO RAN, 2022, 212 p. (in Russian).

Pavlov A.V. Teploobmen pochvy s atmosferoy v severnykh i umerennykh shirotakh territorii SSSR [Heat exchange between the soil and atmosphere in northern and temperate latitudes of the USSR]. Yakutsk, Kn. izd-vo, 1975, 302 p. (in Russian).

Pavlov A.V. Teplofizika landshaftov [Thermal physics of landscapes]. Novosibirsk, Nauka, 1979, 285 p. (in Russian).

Balobaev V.T., Ivanova L.D., Nikitina N.M. et al. Podzemnye vody Central'noy Yakutii i perspektivy ikh ispol'zovaniya [Ground water in Central Yakutia and its prospective use]. Novosibirsk, Acad. Publ. House "Geo", 2003, 137 p. (in Russian).

Prioritetnye napravleniya issledovaniy Instituta merzlotovedeniya im. P.I. Mel'nikova SB RAS na 2012–2022 gg.: broshyura, podgotovlennaya uchenym sovetom [Research priorities of the Melnikov Permafrost Institute for 2012–2022: brochure by the research council].

- the Scientific Council]. Yakutsk, IMZ SO RAN, 2012, 18 p. (in Russian).
- Earth Cryology Council. Razrabotka osnov kriogeneza (Izuchenie kriolitozony Zemli. Prognoz) [Development of the fundamentals of cryogenesis (Earth permafrost research. Prediction]. Yakutsk, IMZ SO AN SSSR, 1988, 23 p. (in Russian).
- Rastegaev I.K., Baksheev D.S., Kamenskiy R.M. Svaynoe fundamentostroenie v kriolitozone [Pile foundation engineering in permafrost areas]. Novosibirsk, Acad. Publ. House "Geo", 2009, 279 p. (in Russian).
- Solov'eva L.N. Morfologiya kriolitozony Sayano-Baykal'skoy oblasti (na primere Buryatskoy ASSR) [Permafrost morphology in the Sayan-Baykal region, Buryatiya ASSR]. Novosibirsk, Nauka, 1976, 126 p. (in Russian).
- Katasonov E.M., Ivanov M.S., Pudov G.G. et al. Stroenie i absolyutnaya geohronologiya alasnykh otlozheniy Central'noy Yakutii [Structure and absolute geochronology of alas deposits in Central Yakutia]. Novosibirsk, Nauka, 1979, 95 p. (in Russian).
- Fedorov A.N. Merzlotnye landshafty Yakutii: metodika vyvayleniya i voprosy kartografovaniya [Permafrost landscapes in Yakutia: Identification and mapping]. Yakutsk, IMZ SO RAN, 1991, 140 p. (in Russian).
- Zhang R.V. Proektirovanie, stroitel'stvo i ekspluataciya gidrotehnicheskikh sooruzheniy nizkogo napora v kriolitozone (na primere Yakutii) [Design, construction, operation and maintenance of small dams in permafrost areas (examples from Yakutia)]. Yakutsk, IMZ SO RAN, 2000, 160 p. (in Russian).
- Zhang R.V. Temperaturnyy rezhim i ustoychivost' nizkonompornykh gidrouzlov i gruntovykh kanalov v kriolitozone [Temperature regime and stability of small dams and canals on permafrost]. Yakutsk, IMZ SO RAN, 2002, 207 p. (in Russian).
- Shepelev V.V. Rodnikovye vody Yakutii [Spring waters of Yakutia]. Yakutsk, Kn. izd-vo, 1987, 128 p. (in Russian).
- Shepelev V.V. Nadmerzlotnye vody. Osobennosti formirovaniya i rasprostraneniya: uchebnoe posobie [Suprapermafrost water: Formation and distribution patterns]. Yakutsk, IMZ SO RAN, 1995, 48 p. (in Russian).
- Grigoriev M.N., Rachold V., Schirrmeister L. Russian-German cooperation SYSTEM LAPTEV SEA, the expedition Lena 2002. Rep. Polar and Marine Res., Bremerhaven, Germany, 2003, vol. 466, 341 p.

Поступила в редакцию 19 июня 2024 г.,  
после доработки – 23 июня 2024 г.,  
принята к публикации 28 июня 2024 г.