

РАЗВИТИЕ ВЗГЛЯДОВ НА ЗАДАЧИ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОГО ИЗУЧЕНИЯ КРИОЛИТОЗОНЫ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДОСТИЖЕНИЙ МЕРЗЛОТОВЕДЕНИЯ ПРИ РЕГИОНАЛЬНЫХ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

DEVELOPMENT OF VIEWS ON SIGNIFICANCE OF PERMAFROST FACTORS FOR FORMATION OF ENGINEERING-GEOLOGICAL CONDITIONS AND ON APPLICATION OF PERMAFROST STUDY ACHIEVEMENTS FOR REGIONAL ENGINEERING-GEOLOGICAL INVESTIGATIONS OF THE PERMAFROST ZONE

ТРОФИМОВ В.Т.

Заведующий кафедрой инженерной и экологической геологии геологического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, д. г.-м. н., профессор, trofimov@rector.msu.ru

КРАСИЛОВА Н.С.

Старший научный сотрудник кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, к. г.-м. н., crasilova.nina@yandex.ru

TROFIMOV V.T.

Head of the Department of Engineering and Ecological Geology, Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, doctor of mineralogy and geology, professor; trofimov@rector.msu.ru

KRASILOVA N.S.

Senior staff scientist of the Department of Engineering and Ecological Geology, Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, crasilova.nina@yandex.ru

Ключевые слова:

мерзлотная обстановка; мерзлые породы; подземные льды; льдистость пород; среднегодовая температура мерзлых пород; зональность; мерзлотные процессы; солифлюкция; термокарст; курумы; криопэги; инженерно-геологические карты; мерзлотные карты.

Key words:

permafrost conditions; permafrost grounds; underground ices; ice content of rocks; average annual temperature of permafrost grounds; zonality; permafrost processes; solifluction; thermokarst; kurums; cryopegs; engineering-geological maps, permafrost maps.

Аннотация

В статье рассмотрены этапы развития взглядов на роль и задачи изучения мерзлотной обстановки как одного из факторов инженерно-геологических условий. Охарактеризованы классические представления мерзловедения о мерзлых породах и сложенных ими массивах, закономерности их распространения, используемые в региональной инженерной геологии, положение мерзлых пород в общей инженерно-геологической классификации горных пород. Описаны особенности гидрогеологических условий криолитозоны, пространственные закономерности и динамика развития в ней мерзлотных процессов, их роль в осложнении инженерно-геологических условий. Показаны способы и степень детальности отражения показателей мерзлотной обстановки на обзорных, мелко- и среднemasштабных инженерно-геологических картах.

Abstract

The article deals with the development stages of views on the role and goals of studying the permafrost environment as one of the factors of engineering-geological conditions. The classical permafrost study concepts on permafrost soils and their massives, the regularities of their distribution used in regional engineering geology, the position of permafrost grounds in the general engineering-geological classification of rocks are characterized. The features of hydrogeological conditions in the permafrost zone, the spatial regularities and dynamics of development of permafrost processes in this zone, their role in complication of engineering-geological conditions are described. The ways and detail level of reflection of permafrost condition indicators on general, small-scale and medium-scale engineering-geological maps are shown.

Введение¹

Суммарная площадь криолитозоны (включая Гренландию и Антарктиду) составляет 40% поверхности Земли и около 75% территории Евразии [32]. Инженерно-хозяйственная деятельность на этих территориях требует специальных конструкторских решений и эксплуатационных технологий. Разрушения сооружений, возведенных на многолетнемерзлых грунтовых массивах, возникают в основном из-за больших и неравномерных осадок, происходящих в результате их оттаивания. Сезонное и многолетнее промерзание грунтов часто приводит к проявлениям процессов пучения, что серьезно усложняет эксплуатацию железных и автомобильных дорог, аэродромов и т.д.

Главными морфологическими характеристиками мерзлотной обстановки, изучаемой для инженерно-геологических целей на современном этапе, являются: состав грунтов; соотношение в них минеральных и органических составляющих и льда; тип криогенной текстуры; среднегодовая температура; распространение, мощность и строение мерзлой толщи; глубина сезонного промерзания и протаивания. Особое внимание уделяется мерзлотным процессам. Все это обуславливает применение специальных методов изучения, оценки и прогнозирования изменений инженерно-геологических условий. И в решении этих вопросов инженеры-геологи опирались на достижения

¹ В сборе исходного материала на первом этапе исследований принимала участие А.С. Герасимова.

исследователей-мерзлотоведов и развивали их совместно для всех регионов Северной Евразии.

Этапы развития взглядов на оценку роли и задачи изучения мерзлотной обстановки как одного из факторов инженерно-геологических условий

Вопросы, связанные с оценкой инженерно-геологических условий строительства в пределах криолитозоны, начали активно разрабатываться в 30-е годы XX века и актуальны до настоящего времени. В истории их развития выделяют два этапа.

Первый этап — с начала 30-х до начала 60-х годов прошлого века — отличался тем, что *наибольшее внимание уделялось характеристике мерзлых пород как оснований сооружений* (И.Я. Баранов, 1933, 1934 гг.; М.И. Сумгин, 1927, 1937 гг.; Н.А. Цытович, М.И. Сумгин, 1937 г.; А.В. Ливеровский, К.Д. Морозов, 1939 г.; М.И. Сумгин, С.П. Качурин и др. 1940 г.; Н.И. Быков, П.Н. Каптеров, 1940 г. и др.). Большое значение для понимания роли мерзлотной обстановки при оценке инженерно-геологических условий территории имела кандидатская диссертация В.А. Кудрявцева «Методика определения динамики мерзлотного процесса при инженерно-геологических исследованиях» [24], в которой он сформулировал положение о деградации и аградации «вечной мерзлоты», показал, что динамика изменений геологических процессов и свойств мерзлых пород является решающим и наиболее активным фактором изменений инженерно-геологических условий криолитозоны в целом.

В 1951 г. В.К. Яновским составлена «Методика исследования вечной мерзлоты в инженерно-строительных целях» (первая в этом направлении), в которой он выделил основные факторы, определяющие мерзлотную обстановку на территории строительства в криолитозоне, и посчитал необходимым особое внимание уделять надмерзлотным водам. Интересна работа Л.А. Братцева [3], в которой отмечены специфика и сложность шахтостроения в криолитозоне на примере Печорского угольного бассейна и показано, что наличие многолетнемерзлых пород является дополнительным усложняющим фактором, который необходимо учитывать наряду с факторами геологическими, гидрогеологическими и экономическими.

Необходимо подчеркнуть, что в течение первого этапа составлялись не только крупномасштабные карты-схемы распространения «вечной мерзлоты» по материалам изыскательских работ и маршрутных исследований (например, В.К. Яновским в 1936 г. для ряда участков Воркутинского и Забайкальского районов), но и карты обзорного масштаба (В.А. Кудрявцев, 1949 г.; А.И. Попов, 1958 г.; И.Я. Баранов [2]). На этих картах в целом верно отражена зональность распространения многолетнемерзлых пород.

Второй этап — с начала 60-х годов XX века до нынешних времен — связан с интенсивным хозяйственным освоением криолитозоны. *С этого времени не только резко вырос объем инженерно-геологических изысканий в ее пределах под конкретные народно-хозяйственные объекты, но и, главное, началось планомерное региональное инженерно-геологическое и геокриологическое ее изучение.* Именно с этого времени различные орга-

низации (ВСЕГИНГЕО, Институт мерзлотоведения им. В.В. Обручева, а позже ПНИИИС, кафедра мерзлотоведения и кафедра грунтоведения и инженерной геологии геологического факультета МГУ, территориальные геологические управления, географический факультет МГУ и др.) начинают проводить площадные инженерно-геологические и мерзлотные исследования в пределах криолитозоны. Как итог этих работ появляются многочисленные публикации по различным вопросам, связанным с инженерно-геологической характеристикой этой территории. В.А. Кудрявцев, Н.И. Труш, К.А. Кондратьева [28] на примере Алдано-Тимптонского междуречья Южной Якутии продемонстрировали особенности методики мелкокомасштабных инженерно-геологических исследований в области многолетней мерзлоты. Их разработки стали основой для вышедшей в свет в 1969 г. «Инструкции по производству комплексной мерзлотно-гидрогеологической и инженерно-геологической съемки масштабов 1:200 000 и 1:500 000» [30]. К числу дополнительных вопросов, которые необходимо решать в процессе проведения инженерно-геологических исследований в криолитозоне, В.А. Кудрявцев [25] отнес:

- разработку специальной инженерно-геологической классификации многолетнемерзлых пород, в которой должна быть отражена зависимость состава и свойств пород выделяемых формаций и геолого-генетических комплексов от их теплового состояния, специфики криогенного состава и строения пород, динамики температурного поля и других геокриологических характеристик;
- изучение особенностей и структуры радиационно-теплового баланса поверхности, его связь с геолого-географической обстановкой района и с теплооборотами в горных породах;
- разработку принципов и приемов инженерно-геологического картирования и районирования.

В 1988–1989 гг. была опубликована пятитомная монография «Геокриология СССР», удостоенная в 1993 г. Государственной премии Российской Федерации [11]. Ее авторы под руководством и при непосредственном участии лауреатов этой премии Э.Д. Ершова, В.В. Баулина, Л.С. Гарагули, С.Е. Гречищева, К.А. Кондратьевой, Н.Н. Романовского, В.Т. Трофимова и Н.И. Труш обобщили огромный материал, который был накоплен при многолетних исследованиях на территории криолитозоны СССР.

Учитывая все опубликованные материалы по характеристике инженерно-геологических условий криолитозоны и свои собственные исследования, проведенные на севере Западной Сибири, В.Т. Трофимов [45] кратко суммировал основные особенности мерзлотной обстановки как фактора инженерно-геологических условий, которые имеют при этом наибольшее значение, следующим образом:

- развитие многолетнемерзлых пород — специфического класса грунтов, свойства которых существенно зависят от количества в них льда и от их температуры и резко меняются с ее изменением, особенно при ее значениях, близких к 0 °С;
- активное протекание специфических мерзлотных процессов, одни из которых (криогенные) являются следствием прогрессивного развития и новообразования многолетнемерзлых толщ и криогенных форм

рельефа, а другие (посткриогенные) — следствием деградации многолетнемерзлых пород и формирования специфических форм рельефа;

- наличие многолетнемерзлых пород коренным образом изменяет гидрогеологическую структуру территории и ее роль как фактора формирования инженерно-геологических условий;
- высокая чувствительность многих показателей мерзлотной обстановки к антропогенным воздействиям определяет высокую чувствительность к ним всей инженерно-геологической обстановки в целом.

Остановимся на истории развития взглядов на характер и значимость изучения главнейших факторов, определяющих специфику инженерно-геологических условий криолитозоны.

Классические представления мерзлотоведения о мерзлых породах и сложенных ими толщах, используемые в региональной инженерной геологии

Мерзлые породы и их типы

Н.И. Толстихин и Н.А. Цытович предложили следующее определение: «Мерзлыми породами, грунтами и почвами называются породы, грунты, почвы², имеющие отрицательную или нулевую температуру, в которых хотя бы часть воды перешла в кристаллическое состояние» [29, с. 5]. П.Ф. Швецов предложил породы и грунты, имеющие отрицательную температуру, но не содержащие льда, называть *морозными* [29, с. 5]. Все эти и охарактеризованные далее положения вошли в практику инженерно-геологических работ.

В настоящее время под собственно мерзлыми породами в геокриологии [32] понимаются естественно-исторические геологические образования, характеризующиеся отрицательной температурой, содержащие лед и незамерзшую воду в форме пленочно-связанной. К ним могут быть отнесены дисперсные породы и трещиноватые или выветрелые магматические, метаморфические и сцементированные осадочные породы. Скопления льда и снега (наземные и подземные) рассматриваются как мономинеральные горные породы, а лед — как специфический минерал. Горные породы, имеющие отрицательную температуру, но не содержащие льда (монокристаллические, дисперсные засоленные) принято называть морозными или охлажденными. Среди многообразия мерзлых и морозных горных пород наиболее сложными объектами являются дисперсные породы.

Мерзлые породы подразделяются на многолетне- и сезонно-мерзлые. Они принципиально отличаются от немерзлых и талых пород тем, что в них имеется новая твердая составляющая, представленная криогидратными минералами — льдом, криогидратами, кристаллогидратами, которые образуются при отрицательной температуре и являются материалом, цементирующим породы (Цытович, Сумгин, 1937 г.; Ершов, Данилов, Чеверев, 1987 г.; Трофимов [45] и др.) и *обуславливаю-*

щим совершенно иной тип структурных связей — криогенный. В этом случае лед рассматривается как составная породобразующая часть мерзлых пород: он не образует крупных скоплений, а рассеян среди составных частей пород в виде цементирующей составляющей или образует прослойки, прожилки, формируя соответствующий тип криотекстуры.

П.А. Шумский [53] предложил в зависимости от наличия, формы и пространственного расположения ледяных шлиров в породе выделять три типа криогенных текстур (массивную, слоистую, сетчатую) и четыре типа льда-цемента (контактный, пленочный, поровый, базальный). В работах Ф.Г. Бакулина, Ю.Б. Баду, В.В. Баулина, Ю.К. Васильчука, Ш.Ш. Гасанова, А.Н. Горбунова, Г.Ф. Грависа, И.Д. Данилова, Г.И. Дубикова, Т.Н. Каплиной, В.Н. Конищева, Н.Ф. Кривоноговой, А.И. Попова, В.И. Соломатина, В.Т. Трофимова, Н.В. Трумель и других даны описания криогенных текстур различных геолого-генетических типов отложений для различных районов области распространения многолетней мерзлоты. При этом особо выделяются работы Е.М. Катасонова [22], предложившего метод мерзлотно-фациального анализа.

Особенности состава мерзлых пород обуславливали внимательное и всестороннее исследование их свойств. Изучались теплофизические [33], водные (Степанов, 1951 г.; И.С. Комаров, 1957 г.; А.А. Ананян, 1952 г. и др.), деформационные (С.С. Вялов, 1959, 1982 гг.; А.Г. Бродский, 1962 г.; Е.П. Шушерина, 1966 г.; Н.А. Цытович, 1973; Б.Г. Хазин, 1974 г.; О.А. Кондакова, 1984 г.; Ю.В. Кулешов, 1985 г.; А.Д. Фролов, 1986 г.; Л.Т. Роман, 1987 г.; Ю.Д. Зыков, 1992 г. и др.); прочностные (Н.К. Пекарская, 1962 г.; Е.П. Шушерина, 1974 г.; В.И. Аксенов и др., 1979 г.; Л.Т. Роман и др., 1994 г. и др.) свойства мерзлых пород.

Об особенностях содержания и распределения льда как составной части толщ многолетнемерзлых пород разных регионов

Этот вопрос имеет большое инженерно-геологическое значение. Для многих регионов установлены региональные особенности содержания и распределения льда по разрезу. Например, для *Западно-Сибирской плиты* В.Т. Трофимов, Ю.Б. Баду и Г.И. Дубиков [46] описали три их типа для эпигенетических мерзлых толщ. Первый из них наиболее распространенный и характеризуется закономерным убыванием льдистости по разрезу, причем с глубиной ледяные шлиры увеличивают мощность наряду с увеличением расстояния между ними. Этот тип разреза считается «классическим» для эпигенетических мерзлых толщ. Характер распределения льда в разрезе показывает, что сильное льдовыделение в верхней части обусловлено перераспределением льда в породе в результате ее миграции к фронту промерзания, а влажность породы до промерзания и скорость промерзания обуславливают определенный характер текстур.

Второй тип разреза характеризуется повышенным (до 50–60%) и более или менее равномерным распределением льда по всей глубине. Этот тип обычен для рыхлых отложений, в толщах которых или ниже существовали водоносные горизонты, обеспечивающие большой приток влаги.

² Такое перечисление неправомерно, так как грунты — это любые горные породы, почвы, осадки и породоподобные антропогенные образования.

Третий тип приурочен к разрезам с подземным льдом (преимущественно пластовым), подстилающим эпигенетические толщи рыхлых отложений. Для него характерно увеличение льдистости с глубиной.

Большое внимание исследователи уделяли толщам, названным П.А. Соловьевым по обилию подземного льда «ледовыми комплексами», широко развитыми на приморских низменностях севера России, Центральной Якутии, в некоторых районах Западной Сибири. В результате работ А.А. Архангелова, Е.М. Катасонова, Ю.А. Лаврушина, Т.Н. Каплиной, А.И. Попова, Н.Н. Романовского, В.И. Соломатина, С.В. Томирдиаро, Н.А. Шило и других накоплен значительный материал по особенностям распространения отложений таких комплексов, условиям их залегания и криогенного строения. Сейчас под *ледовым комплексом* понимается «особый горизонт, насыщенный жилами льда, более или менее единый и плащевидно залегающий на обширных участках, неоднородный по возрасту, составу, генезису и мощности. Его прерывают термокарстовые котловины и участки, на которых жилы льда не образовывались или возникали в ограниченных размерах» [12, с. 80.]. Генезис ледовых комплексов в течение нескольких десятилетий являлся предметом острых дискуссий.

При анализе характера железнодорожного строительства на территории развития ледового комплекса в Центральной Якутии (Позин, Королев, Наумов, 2009 г.) отмечен чрезвычайно сложный экстремальный характер существующих здесь инженерно-геокриологических условий, обусловленный максимальной льдонасыщенностью верхней части разреза комплекса (от 7–8 до 10–12 м) с общей льдистостью от 0,4 до 0,8 д.ед. и более, мощным слоем годовых колебаний температур (до 18–20 м) с изменением температур грунтов на его подошве от минус 0,5 до минус 4,5 °С, с изменением мощности сезонно-талого слоя в пределах участка от 0,5 до 2 м, широким распространением криогенных процессов. Авторы этой работы считают целесообразным обходить при строительстве участки распространения «ледового комплекса», даже если для этого придется существенно удлинять магистрали.

О крупных скоплениях подземных льдов в многолетнемерзлых толщах

Массивы с мощными повторно-жильными и пластовыми льдами всегда вызывали большой научный и практический интерес не только у мерзлотоведов. Они являются и объектом инженерно-геологических работ. Это обусловлено тем, что многие важные промышленно-гражданские объекты и линейные сооружения располагаются либо вблизи таких массивов, либо непосредственно в их пределах. История развития учения о подземных льдах освещена П.А. Шумским [54], затем Б.И. Втюриным (1975 г.). Наиболее полная основополагающая генетическая классификация подземных льдов создана П.А. Шумским [54]. Классификации других авторов (А.И. Попов, 1967 г.; Б.И. Втюрин, 1975 г.; Соломатин, 1981 г.) являются лишь ее вариациями.

Крупные скопления подземных льдов разделяются на жильные и пластовые (включающие погребенные льды).

Ледяные жилы подразделяются на эпигенетические и сингенетические. Первые образуются в тех осадочных породах, которые промерзают после их накопле-

ния; вторые растут в процессе формирования отложившейся синхронно осадконакоплению. Каждый из них имеет свои характерные признаки. Состав льда, его структуру, содержащиеся в нем включения изучали П.А. Шумский (1955 г.), Б.А. Савельев (1980 г.) и др., прочностные свойства — Е.П. Шушерина и А.Е. Гуликова (1964 г.) и др. В работах П.А. Шумского, Б.И. Втюрина, А.И. Попова Н.Н. Романовского, В.И. Соломатина, Ю.К. Васильчука описаны основные признаки сингенетических ледяных жил, включающие вертикальную протяженность, характер боковых контактов, соотношение с ними элементарных ледяных жилок и крупных шлиров сегрегационного льда вмещающей льдистой породы.

В вопросе о способах, механизме и условиях формирования крупных сингенетических жил нет единства взглядов. Большинство авторов (Е.М. Катасонов, А.И. Попов, Б.И. Втюрин, Н.Н. Романовский и др.) считали, что наиболее крупные сингенетические ледяные жилы, распространенные на приморских низменностях северо-востока Сибири и Центральной Якутии, формировались в процессе накопления аллювиальных отложений высокой поймы. Другие исследователи (Н.А. Шило, Ю.А. Лаврушин, С.В. Томирдиаро и др.) высказывают мнения об эоловом, делювиально-солифлюкционном, озерно-аласном генезисе отложений, включающих крупные сингенетические жилы. Третьи (сторонники контракционной гипотезы) считают, что рост вверх и расширение ледяных жил происходят за счет образующихся в морозобойных трещинах элементарных ледяных жилок.

Пластовые ледяные залежи особенно широко развиты в пределах Ямала, Гыданского полуострова, на Чукотке. Они встречены также на севере европейской части России, на Таймыре. Наиболее крупные массивы приурочены к низменностям. Много внимания исследователи уделяли изучению их генезиса. В результате существуют две основные точки зрения: внутригрунтовое происхождение пластовых льдов (Б.И. Втюрин, 1966, 1975 гг.; А.И. Попов, 1967 г.; И.Д. Данилов, 1969, 1975 гг.; В.В. Баулин, Г.И. Дубиков, 1970 г. и др.) и глетчерная природа пластовых залежей (Толь, 1894 г.; В.И. Соломатин [40] и др.). В.Т. Трофимов, Ю.Б. Баду и Ю.К. Васильчук (1975 г.) показали разный их генезис в пределах Западно-Сибирской плиты. Подробно состояние проблемы генезиса жильных льдов изложено В.И. Соломатиным в монографии «Физика и география подземного оледенения» [40]. Там же детально рассмотрены аргументы в пользу теории погребенного глетчерного происхождения пластовых льдов. Много внимания этим проблемам уделил Ю.Д. Баду в монографии «Криолитология» [1].

Пластовые залежи принято считать гомогенными, определяя их как сегрегационные, инъекционные, повторно-инъекционные, погребенные ледниковые и т.п. Ю.К. Васильчук [4] предложил свою классификацию пластовых залежей, в которой выделил две их новые категории — гомогенные и гетерогенные. На второй стадии деления обе эти категории были подразделены на автохтонные и аллохтонные пластовые ледяные залежи, а для гетерогенных также было введено сочетание автохтонных и аллохтонных. На третьей стадии деления пластовые ледяные залежи были подразделе-

Таблица 1

Разновидности мерзлых грунтов по их температуре (по ГОСТ 25100-2011)	
Разновидность грунта	Температура грунта t , °C
Немерзлый (талый)	≥ 0
Мерзлый	$< T_{bf}^{**}$
Охлажденный	$0 \div T_{bf}$
Морозный	< 0
Сыпучемерзлый*	< 0

* Для грунтов с суммарной влажностью $w_{tot} \leq 3\%$.
 ** T_{bf} — температура начала замерзания грунта.

ны по типу льдообразования на инъекционные, сегрегационные, инфильтрационные, погребенные и т.п., а также были выделены сочетания залежей разных типов льдообразования в едином массиве.

Об инженерно-геологически ориентированных классификациях многолетнемерзлых пород

Единой общей классификации мерзлых пород не разработано. И это несмотря на то, что еще в 1967 году В.А. Кудрявцев предложил систему *классификационных признаков многолетнемерзлых пород*, которые разделил на три группы:

- признаки, характеризующие геолого-геоморфологическую обстановку и состав пород;
- признаки, определяющие особенности теплообмена на поверхности почвы и в толщах горных пород в связи с геолого-геоморфологической обстановкой;
- признаки, определяющие особенности мерзлых толщ и все их частные характеристики.

Общая классификация толщ многолетнемерзлых пород не была составлена из-за бесконечного числа сочетаний этих признаков. Но предложенная В.А. Кудрявцевым система признаков использовалась при создании региональных и специальных классификаций.

Частные классификации базируются на подразделении мерзлых горных пород по какому-то одному признаку, например по льдистости, криогенному

строению, мерзлотному генезису, температуре, состоянию грунтов, их пучинистости, мощности и др. Многие из них вошли в нормативные документы — ГОСТы, СНиПы и СП (табл. 1–4) и широко используются при инженерно-геологических изысканиях и региональных работах.

Для понимания закономерностей формирования и характеристики мерзлых толщ большое значение имеют региональные классификации пород криолитозоны, разработанные Б.С. Павловым (1961 г.) для Норильского горнопромышленного района, Л.Е. Ведерниковым (1965 г.) и Е.С. Мельниковым (1969 г.) — для северо-востока СССР, Н.В. Труш [51] — для Южной Якутии, Г.М. Эпштейном (1964 г.) — для Алданского района и др. В них отражены подходы к классифицированию пород, разработанные в инженерной геологии, но получившие дальнейшее развитие применительно к мерзлым и морозным породам.

О положении мерзлых пород в общей инженерно-геологической классификации горных пород и общей классификации грунтов и грунтовых толщ

Мерзлые породы в общей инженерно-геологической классификации пород в разработках Е.М. Сергеева, В.А. Приклонского, Л.Д. Белого не находили места. И даже в пятом издании учебника «Грунтоведение» [15] Е.М. Сергеев, признав в его тексте наличие третьего класса грунтов — мерзлых (наряду с классами дисперсных и скальных грунтов), не поместил их в составленную им общую классификацию грунтов, указав, что их изучают мерзлотоведы. В классификациях же Ф.П. Саваренского и В.Д. Ломтадзе мерзлые грунты обособлялись в категорию специфических грунтов.

Сдвиг к обязательному учету мерзлых грунтов в качестве самостоятельного класса в их общей классификации произошел, как отмечали Р.С. Зиангиров и В.Т. Трофимов [48], в начале 90-х годов прошлого века при пересмотре ГОСТ 25 100-82 «Грунты. Классификация» уже после ухода от дел Е.М. Сергеева. В итоге

Таблица 2

Подразделение незасоленных мерзлых грунтов по их состоянию* (по ГОСТ 25100-2011)			
Грунты	Разновидность грунта		
	твердомерзлый (при $m_{vf} \leq 0,01$ МПа ⁻¹) при $t < T_h$ и значениях T_h , °C	пластичномерзлый ($m_{vf} > 0,01$ МПа ⁻¹) при $T_h < t < T_{bf}$	сыпучемерзлый при $t \geq 0$ °C
Скальные и полускальные	0	-	-
Крупнообломочные	0	при $S_r < 0,8$	при $w_{tot} \leq 3\%$
Пески гравелистые, крупные и средней крупности	-0,1		
Пески мелкие и пылеватые	-0,3		
Супеси	-0,6	все	
Суглинки	-1,0		
Глины	-1,5		

* t — температура грунта, °C; T_h — температурная граница твердомерзлого состояния грунта, °C; T_{bf} — температура начала замерзания грунта, °C; m_{vf} — коэффициент сжимаемости грунта (параметр, характеризующий объемную деформируемость мерзлого грунта под нагрузкой), МПа⁻¹; S_r — степень заполнения пор льдом и незамерзшей водой, д.ед.; w_{tot} — суммарная влажность грунта, %.

в ГОСТ 25100-95 мерзлые грунты *официально* заняли подобающую им позицию. В этой классификации грунты подразделены на классы, группы, подгруппы, типы, виды и разновидности.

Классы грунтов обособлены по общему характеру структурных связей:

- природные скальные грунты с жесткими структурными связями — кристаллизационными и цементационными;
- природные дисперсные грунты с водно-коллоидными и механическими структурными связями;
- *природные мерзлые грунты с криогенными структурными связями*;
- техногенные грунты с различными структурными связями, образованными в результате деятельности человека.

Группы грунтов (скальные, полускальные, связные, несвязные, ледяные) обособлены по характеру структурных связей с учетом их прочности. *Подгруппы* (интрузивные, эффузивные, метаморфические, осадочные) разделены по происхождению и условиям образования.

В *классе мерзлых пород* — те же самые группы и подгруппы, но *промерзшие*.

В *группе ледяных грунтов* выделены в том числе *конституционные (внутригрунтовые), погребенные и пещерно-жильные грунты*.

Типы грунтов подразделены по вещественному составу. Для *мерзлых пород* это ледяные минеральные, ледяные органо-минеральные, ледяные органические грунты. Для *ледяных* — льды.

Виды грунтов обособлены по наименованию грунта, принятому в петрографии и литологии (с учетом размеров частиц), *разновидности грунтов* — по количественным показателям вещественного состава, свойств и структуры.

В общей классификации грунтов, опубликованной в 6-м издании учебника «Грунтоведение», вышедшего в свет в 2005 году [48], систематика мерзлых грунтов получила дальнейшее развитие. В царстве природных грунтов они выделены как самостоятельный *класс мерзлых грунтов* с криогенными связями, который подразделяется на три группы. Первая группа — *скальные промерзшие грунты* — включает подгруппу промерзших эпигенетически интрузивных, эффузивных, метаморфических и осадочных пород, отнесенных к типу ледо-минеральных. Вторая группа — *дисперсные промерзшие грунты* — включает подгруппу промерзших син- и эпигенетических осадочных и вулканогенно-осадочных пород, подразделенных далее на типы ледо-минеральных, минерально-ледяных, органо-минерально-ледяных и органо-ледяных. Третья группа — *ледяные грунты* — подразделяется на три подгруппы — конституционные (внутригрунтовые), погребенные и пещерно-жильные льды, которые подразделяются на девять видов льда (сегрегационный, инъекционный, ледниковый, наледный, речной, озерный, морской, донный, инфильтрационный, жильный, повторно-жильный, пещерный).

Самые мелкие категории — разновидности — предлагается выделять по степени морозной пучинистости, льдистости за счет видимых ледяных включений, температурно-прочностным свойствам, степени засоленности, текстуре.

Таблица 3

Критерии разделения грунтов по льдистости за счет видимых ледяных включений (по ГОСТ 25100-95)		
Разновидность грунта	Льдистость грунтов за счет видимых ледяных включений, д.ед.	
	скальных и полускальных	дисперсных
Слабольшедистый	< 0,01	< 0,20
Льдистый	0,01÷0,05	0,20÷0,40
Сильнольдистый	> 0,05	0,40÷0,60
Очень сильнольдистый	-	0,60÷0,90

Таблица 4

Классификация мерзлых грунтов по степени морозной пучинистости ϵ_{fn} (по ГОСТ 25100-2011)	
Разновидность грунта	ϵ_{fn} , %
Непучинистый	< 1,0
Слабопучинистый	1,0÷3,5
Среднепучинистый	3,5÷7,0
Сильнопучинистый	7,0÷10,0
Чрезмернопучинистый	> 10,0

В царстве *техногенных* грунтов *мерзлые грунты* подразделены на четыре *группы*: скальные промороженные, полускальные промороженные, связные промороженные, несвязные промороженные. *Подгруппы* мерзлых грунтов выделены по типу и месту воздействия: природные образования, измененные в условиях естественного залегания тепловым воздействием; промерзшие перемещенные природные образования (насыпные и намывные); антропогенные промерзшие образования (насыпные и намывные). К *типам и видам* мерзлых грунтов отнесены все типы и, соответственно, виды промороженных природных скальных и дисперсных грунтов и антропогенных образований.

ГОСТ 25100-95 [14] был введен в действие 1 июля 1996 г. и в течение почти 15 лет успешно выполнял свое предназначение. Но согласно приказу Минрегиона развития РФ от 4.10.2010 г. № 439 «Об утверждении Плана работ по разработке и утверждению сводов правил и актуализации ранее утвержденных строительных норм и правил» этот ГОСТ в числе действующих ранее в области инженерных изысканий для строительства других нормативных документов необходимо было обновить (актуализировать). Для актуализации и гармонизации ГОСТ 25100 была создана рабочая группа из представителей АСИ «РО Стройизыскания», ИГЭ РАН, МГУ им. М.В. Ломоносова, РГГРУ, МГСУ, ГУП «Мосгоргеотрест», ГП МО «Мособлгеотрест», ЗАО «СоздорНИИ», ОАО «Фундаментпроект» и других организаций в рамках Национального объединения изыскателей РФ (НОИЗ). Предложенная рабочей группой классификация, по мнению В.Т. Трофимова, Р.С. Зиангирова и В.А. Королева [47], не улучшила, а ухудшила прежнюю классификацию по ряду причин:

Таблица 5

Деление класса природных дисперсных грунтов (с механическими и физико-химическими структурными связями) в общей классификации, предложенной В.Т. Трофимовым, Р.С. Зиангировым, В.А. Королевым [47]					
Под-классы	Группы	Типы	Подтипы	Виды*	Разновидности*
Связные (с физико-химическими структурными связями)	Осадочные	Минеральные	• Силикатные, • карбонатные, • железистые, • полиминеральные	• Глинистые	<i>Выделяются по:</i> • гранулометрическому составу (крупнообломочные грунты и пески); • числу пластичности и гранулометрическому составу (глинистые грунты и илы); • неоднородности гранулометрического состава (пески); • показателю текучести (глинистые грунты); • относительной деформации набухания без нагрузки (глинистые грунты); • относительной деформации просадочности (глинистые грунты); • коэффициенту водонасыщения (крупнообломочные грунты и пески). <i>Пески также выделяются по:</i> • коэффициенту пористости; • степени плотности;
Несвязные (с механическими структурными связями)			Органо-минеральные	• Илы, • сапропели, • заторфованные	• Торфа и др.
		Минеральные	• Силикатные, • карбонатные, • полиминеральные	• Песчаные, • крупнообломочные	• засоленности и/или загипсованности; • относительной деформации пучения; • температуре; • высоте капиллярного поднятия (пески, глинистые грунты)

* Почвы (щебенистые, дресвяные, песчаные, глинистые, торфяные и др.) выделяются по совокупности признаков как соответствующие виды и разновидности грунтов.

- в ней были использованы иные, необоснованные, базовые принципы построения;
- стремление упростить классификацию привело к исключению из нее видов грунтов в прежнем объеме;
- принципиальной ошибкой явилось стремление объединить в одной классификации природные и техногенные грунты, в результате чего многие техногенные грунты пропали из классификации;
- в классе скальных грунтов есть ошибки — в него попали и нескальные грунты;
- ошибочным является выделение элювиальных грунтов в отдельный тип, так как гипергенез является начальной стадией осадочного процесса и, следова-

Таблица 6

Деление класса природных мерзлых грунтов (с криогенными структурными связями) в общей классификации грунтов, предложенной В.Т. Трофимовым, Р.С. Зиангировым, В.А. Королевым [47]					
Подклассы	Группы	Подгруппы	Типы	Виды	Разновидности
Скальные	Промерзшие	• Интрузивные, • эффузивные, • метаморфические, • осадочные	Ледяные минеральные	Те же, что и для скальных грунтов	Выделяются по: • льдистости за счет видимых ледяных включений; • деформационным свойствам и температуре; • засоленности; • состоянию; • криогенной текстуре и др.
Полускальные		• Эффузивные, • осадочные			
Связные		• Осадочные	Ледяные минеральные Ледяные органо-минеральные Ледяные органические	Те же, что и для дисперсных грунтов	
Ледяные	Конституционные (внутригрунтовые)		Льды	• Сегрегационные, • инъекционные, • ледниковые	
	Погребенные			• Наледные, • речные, • озерные, • морские, • донные, • инфильтрационные (снежные)	
	Пещерно-жильные			• Жильные, • повторно-жильные, • пещерные	

тельно, элювиальные грунты должны рассматриваться среди осадочных;

- в классе дисперсных грунтов необходимо было исключить вид «пылеватые грунты» (исходя из этого авторы предложили в работе [47] иной вариант классификации, базирующейся на предыдущей в [14], но существенно уточненной и дополненной (табл. 5–7).

В новом ГОСТ 25100-2011 [13], утвержденном 1 января 2013 г., некоторые из этих замечаний были учтены. В этом документе мерзлые грунты выделены как класс мерзлых грунтов, объединяющий грунты, которые наряду с другими структурными связями обладают криогенными связями (за счет льда). Грунты с криогенными и одновременно с кристаллизационными и цементационными структурными связями выделяют в подкласс скальных мерзлых грунтов; грунты с криогенными и одновременно с физическими и физико-хи-

мическими структурными связями — в подкласс дисперсных мерзлых грунтов; грунты только с криогенными связями выделяют в подкласс ледяных грунтов. Но в целом эта классификация по своему содержанию проигрывает таковой из ГОСТ 25100-95.

Толщи мерзлых пород нашли свое место в *инженерно-геологических классификациях грунтовых толщ*. Е.М. Сергеев, А.С. Герасимова и В.Т. Трофимов [38] при разработке легенды к «Карте грунтовых толщ Западно-Сибирской плиты масштаба 1:1 500 000» учитывали две группы признаков. Первая из них включала показатели состава и строения толщ, вторая — современного состояния. По особенностям состава на первом уровне иерархической системы были выделены две группы грунтовых толщ — сложенные породами с жесткими связями и сложенные породами без них, включая породы с криогенным типом связей. Типы грунтовых толщ разного состава подразделялись по

Таблица 7

Деление классов техногенных скальных, дисперсных и мерзлых грунтов в общей классификации В.Т. Трофимова, Р.С. Зянгирова, В.А. Королева [49]

Классы	Подклассы	Группы	Подгруппы	Типы	Виды	Разновидности	
Скальные	• Скальные, • полу- скальные	Природные, измененные в условиях естественного залегания	<i>Измененные воздействием:</i> • химическим, • физическим, • физико-химическим, • биологическим	Те же, что и для природных скальных грунтов	Те же, что и для природных скальных грунтов		
		Природные, измененные в условиях естественного залегания	<i>Измененные воздействием:</i> • химическим, • физическим, • физико-химическим, • биологическим	Те же, что и для природных дисперсных и скальных грунтов (раздробленных)	Те же, что и для природных дисперсных и скальных грунтов (раздробленных)	Выделяются как соответствующие разновидности классов природных грунтов с учетом специфических особенностей и свойств техногенных грунтов	
Дисперсные	• Связные, • несвязные	Природные перемещенные	• Насыпные, • намывные	Грунты производственной и хозяйственной деятельности	<i>Грунты бытовых и промышленных отходов:</i> • отвалов, • гидроотвалов, • хвостохранилищ, • свалок, • строительных отходов; • шлаки, • шламы, • золы, • золошлаки и др.		
		Антропогенные	• Насыпные, • намывные				
Мерзлые	• Скальные, • полу- скальные	Природные, измененные в условиях естественного залегания	<i>Измененные воздействием:</i> • химическим, • физическим, • физико-химическим, • биологическим	Те же, что и для природных мерзлых грунтов	Все виды природных скальных и полускальных грунтов	Выделяются как соответствующие разновидности классов природных грунтов с учетом специфических особенностей свойств техногенных грунтов	
		Природные, измененные в условиях естественного залегания	<i>Измененные воздействием:</i> • химическим, • физическим, • физико-химическим, • биологическим				
	• Связные, • несвязные, • ледяные	Природные перемещенные	• Насыпные, • намывные	<i>Измененные воздействием:</i> • химическим, • физическим, • физико-химическим, • биологическим		Все виды природных мерзлых грунтов	
		Антропогенные	• Насыпные, • намывные, • намороженные				
					<i>Грунты бытовых и промышленных отходов:</i> • строительных отходов, • шлаки, • шламы, • золы, • золошлаки и др.; <i>искусственные льды</i>		

особенностям состояния, обусловленного фазовым состоянием воды и ее количеством в них, на подтипы (многолетнемерзлые, многолетнемерзлые в нижней части; сильно и избыточно увлажненные в верхней части; талые сильно и избыточно увлажненные; талые умеренно увлажненные). Далее многолетнемерзлые грунтовые толщи подразделялись по среднегодовой температуре на виды, а по льдистости — на подвиды. Виды талых грунтов обособлялись по глубине залегания грунтовых вод, а подвиды — по характеру (наличию или отсутствию) их агрессивности.

В.Т. Трофимовым с соавторами [42, 43] был разработан новый вариант классификационных построений. Грунтовые толщи, отнесенные к классу пород без жестких связей, на первом этапе деления подразделялись по фазовому состоянию воды в грунтах, на втором — по их составу (был использован принцип преобладания грунтов данного состава), на третьем — по степени увлажненности/льдистости, на четвертом — по глубине залегания грунтовых вод для талых грунтовых толщ и среднегодовой температуре для многолетнемерзлых толщ. На основе этих построений были составлены: «Карта грунтовых толщ Нечерноземной зоны масштаба 1:1 500 000» [21], карты всей территории европейской части СССР масштаба 1:1 500 000, а также «Карта грунтовых толщ Западно-Сибирской плиты масштаба 1:1 000 000».

Для классификации крупных геологических тел используется понятие формации. П.Ф. Швецов в 1956 г. [29] ввел понятие «*геокриологическая формация*» как основу для мерзлотного районирования, определив ее как типичную для данного участка, района или области мерзлую толщу земной коры, сравнительно однородную по составу, строению, температуре, мощности, глубине залегания от поверхности, степени и характеру прерывистости в пространстве, водоносности и водопроницаемости горных пород. Но в то время этот метод не нашел применения.

С предложениями по выделению *криогенных формаций* выступали и Б.А. Зубков (1966, 1973 гг.), и Е.М. Касанов (1983 г.). Последний выделил три мерзлотно-геологические формации:

- коренных скальных грунтов;
- рыхлых кайнозойских отложений, промороженных эпигенетически;
- отложений, накопившихся в условиях многолетней мерзлоты — криогенную формацию, подразделенную далее на геолого-генетические комплексы.

Сделанные вышеуказанными авторами предложения были выдвинуты с позиций исторической криологии (по характеру криолитогенеза).

Т.Н. Каплина [20] предложила все геологические тела, испытывающие или испытывавшие в прошлом воздействие криогенеза, обозначить термином «максимальная криолитосфера» и разделить ее на четыре формации: сезонно-криогенную, синкриогенную, эпикриогенную и палеокриогенную. Последняя охватывает породы, которые в позднем кайнозое подвергались многолетнему промерзанию, но в настоящий момент геологической истории являются протаявшими.

В.Т. Трофимов [44], предлагая создать классификацию инженерно-геологических формаций, считал не-

обходимым предварительно создать классификацию геологических формаций по особенностям современного инженерно-геологического состояния пород, обусловленного фазовым состоянием (талых, немерзлых, многолетнемерзлых образований) и количеством жидкой компоненты в них. По его мнению, классификация инженерно-геологических формаций, в отличие от классификации геологических формаций, может быть выполнена в виде двухкоординатной таблицы-матрицы, по одной оси которой (лучше вертикальной) рассматривается систематика классических геологических формаций, выделяемых по геолого-структурным и литолого-петрографическим признакам, а по другой — классификация по второй системе признаков, описывающих особенности современного инженерно-геологического состояния пород, слагающих геологические формации. Сами же инженерно-геологические формации разных иерархических уровней (разных объемов) будут обособляться в этой таблице в виде клеток разного размера. По существу, создание классификации инженерно-геологических формаций предусматривает разработку трех классификаций:

- классических геологических формаций;
- по фазовому составу и количеству жидкого компонента;
- инженерно-геологических формаций, получаемых автоматически в виде клеток таблицы-матрицы.

Классические представления об особенностях гидрогеологических условий криолитозоны и их учет при региональных инженерно-геологических работах

Формирование криолитозоны существенным образом отразилось, как было показано гидрогеологами и мерзлотоведами, на условиях питания, движения, разгрузки подземных вод, их химическом составе, режиме, температуре, общей гидродинамической обстановке ранее существовавших водоносных горизонтов, комплексов и зон трещиноватости, практически на всех особенностях гидрогеологической структуры и ее роли в формировании инженерно-геологической обстановки в целом.

Наиболее полно эти вопросы отражены в работах Н.И. Толстихина [41], П.Ф. Швецова (1951 г.), А.И. Калябина (1960 г.), В.А. Кудрявцева и Б.Н. Достовалова (1967 г.), Н.Н. Романовского (1983, 1993 гг.), С.М. Фотиева (1978 г.), О.Н. Толстихина (1984 г.).

Н.И. Толстихиным [41] впервые была приведена классификация подземных вод «мерзлой зоны». В ней были выделены три класса подземных вод — надмерзлотные, межмерзлотные и подмерзлотные — с последующим более детальным их расчленением. Этот подход был положен в основу всех последующих общих и региональных классификаций подземных вод, используемых при мерзлотно-гидрогеологических и инженерно-геологических исследованиях криолитозоны. Н.Н. Романовский [37], уточняя классификацию Н.И. Толстихина, предложил следующее подразделение подземных вод области распространения многолетнемерзлых пород:

- *надмерзлотные воды*, циркулирующие в многолетне- и сезонно-талых слоях выше кровли многолет-

немерзлых горных пород (они, в свою очередь, подразделяются на воды слоя сезонного оттаивания, полностью промерзающие зимой, и воды слоя несквозных многолетних таликов);

- *подмерзлотные воды* первого от подошвы мерзлой толщи водоносного горизонта или комплекса;
- *воды таликовых зон*, ограниченных мерзлыми породами по боковым поверхностям, которые являются областями питания и разгрузки подмерзлотных и межмерзлотных вод;
- *межмерзлотные* (циркулирующие в талых слоях, ограниченных сверху и снизу толщами многолетнемерзлых пород) и *внутримерзлотные* (в линзах и прослоях талых вод, ограниченных со всех сторон мерзлыми породами) *воды*, не имеющие водообмена с поверхностными и подземными водами.

Данная классификация Н.Н. Романовского была дополнена таблицами, в которых по определенным классификационным признакам проводятся более детальное подразделение выделенных типов вод и их характеристика. Эта классификация используется в настоящее время криолитологами практически без изменений. Такая дифференциация подземных вод отражает изменения гидрогеологических структур в процессе криогенеза. Эти вопросы рассмотрены в работах вышеуказанных авторов, а также отражены на «Геокриологической карте СССР» масштаба 1:2 500 000 [10].

Из этих работ следует, что в районах прерывистой и островной криолитозоны данные изменения менее существенны по сравнению с районами сплошного развития мерзлоты. В целом же криогенез по-разному сказывается на характере ранее существовавшего подземного стока в гидрогеологических структурах разного типа. Так, если часть гидрогеологических массивов в результате криогенного воздействия промерзла на всю мощность ранее обводненной зоны региональной трещиноватости, то благодаря этому такие структуры потеряли свое первоначальное гидрогеологическое значение и перешли в криогенную фазу развития. Если мощность мерзлой толщи меньше зоны региональной трещиноватости горных пород, то существующие подмерзлотные воды оказываются изолированными от поверхностного влияния. В этих случаях в них создаются зоны замедленного и даже застойного режима водообмена. В других случаях подземный сток концентрируется и локализуется по наиболее «промытым» направлениям. При этом в последнем случае питание в зонах подмерзлотного стока надежно обеспечивается через инфильтрационные сквозные талики.

В пределах артезианских бассейнов изменение гидрогеологической обстановки в связи с глубоким и сплошным их промерзанием определяется соотношением мощности сформировавшейся мерзлой толщи с мощностью осадочного чехла и содержащегося в нем пояса пресных вод.

При резких сменах похолоданий и потеплений (и наоборот) при достаточно большой продолжительности этих периодов формируется двухэтажная система криогенных водоупоров, различных по времени их образования. В тех случаях, когда осадочный чехол незначителен и полностью проморожен (краевые ча-

сти платформ, артезианские бассейны межгорных впадин или наложенных впадин), регионально развитые пластовые воды отсутствуют. Подземные воды могут быть сосредоточены лишь в над- и межмерзлотных таликах.

Когда мощность мерзлой толщи меньше толщины осадочного чехла, но равна или больше мощности пояса пресных вод, пресные подземные воды промерзают. Ниже мерзлой толщи могут существовать исключительно соленые воды или рассолы с минерализацией от 20 до 300 г/л, обладающие высокой агрессивностью. Такие воды в подмерзлотной части разреза могут иметь отрицательную температуру. Н.И. Толстихин назвал их *криопэгми*. Криопэгми с высокой минерализацией, проявляющие сульфатную и магниезальную агрессивность и существенно осложняющие инженерно-геологические условия, были встречены даже на небольшой глубине в разрезах верхнечетвертичных и голоценовых морских отложений севера Западно-Сибирской плиты [17, 34].

В отдельных случаях, когда мощность мерзлой толщи меньше толщины осадочного чехла и пояса пресных вод, воды верхних подмерзлотных водоносных горизонтов остаются пресными. Гидрогеологическая обстановка в этих случаях определяется характером прерывистости мерзлой толщи.

Таков далеко не исчерпывающий перечень криогенных изменений в гидрогеологических структурах, существовавших до промерзания, которые необходимо учитывать при инженерно-геологической оценке территории.

Пространственные закономерности и динамика развития современных мерзлотных процессов и их роль в осложнении инженерно-геологических условий

Одними из важнейших характеристик инженерно-геологических условий криолитозоны являются данные о специфических, как правило неблагоприятных и опасных с точки зрения освоения этой территории, мерзлотных процессах и явлениях. Это и объясняет то, что вопросами изучения этих процессов и явлений в разные годы занимались многие исследователи. Основоположниками данного направления в 30–40-е годы XX столетия были М.И. Сумгин, Б.Н. Достовалов, И.А. Золотарь, С.П. Качурин, В.А. Кудрявцев, А.И. Попов, В.Г. Петров, П.Ф. Швецов, В.К. Янковский. Начиная с 60-х годов XX века изучением различных видов этих процессов, закономерностей их формирования, а также форм их проявления занимались В.Р. Алексеев, Ф.Э. Арэ, Ю.К. Васильчук, Л.С. Гарагуля, С.Е. Гречищев, Г.Ф. Гравис, В.Н. Данько, Л.А. Жигарев, Т.Н. Каплина, В.Л. Невечеря, В.О. Орлов, В.Л. Познанин, Н.Н. Романовский, В.Л. Суходольский, О.Н. Толстихин, В.Т. Трофимов, А.И. Тюрин, Г.М. Фельдман, Ю.А. Шур и др.

Л.С. Гарагуля в 1966 году [7, 8] разработала систематизацию процессов и явлений в криолитозоне по признакам, наиболее полно раскрывающим их механизм и связь с теплообменом в породах. Она выделила группы и виды экзогенных геологических процессов

криолитозоны, механизмы и причины их развития, основные формы их проявления в отложениях и рельефе. Всего было выделено четыре группы процессов:

- *собственно криогенные*, обусловленные годовыми и многолетними колебаниями температур на земной поверхности и в подстилающих породах (морозобойное растрескивание и криогенное выветривание, морозное пучение пород и наледообразование, термокарст и др.);
- *термогидрогенные*, обусловленные тепловым и механическим воздействием водных масс на оттаивающие и мерзлые породы, годовыми колебаниями теплообмена на поверхности, колебаниями водного баланса поверхности (термоабразия, термоэрозия, заболачивание и др.);
- *гравитационные*, обусловленные гравитацией, поверхностным и внутригрунтовым стоком вод, годовыми колебаниями теплообмена на поверхности (солифлюксия, оползание, осыпание, криодесерпция, курумообразование и др.);
- *эоловые*, обусловленные деятельностью ветра.

Для всех выделенных групп процессов самое большое значение имеет зависимость их развития от фазовых превращений влаги при промерзании и оттаивании пород, от динамики температурного и влажностного полей в массивах горных пород.

В те же годы в связи с проведением планомерных инженерно-геологических и геокриологических исследований в пределах криолитозоны одновременно с картированием проводилось изучение криогенных форм рельефа в различных регионах СССР: в Западной Сибири — В.В. Баулиным, Е.Б. Белопуховой, Г.И. Дубиковым, П.И. Кашперюком, В.Г. Кудряшовым, В.Т. Трофимовым, Н.Г. Фирсовым и др.; в Средней Сибири — Н.С. Даниловой, И.А. Некрасовым, С.М. Фотиевым, Н.С. Шевелевой; в Якутии — Е.М. Катасоновым, Н.И. Мухиным, П.А. Соловьевым, М.И. Тишиным, Н.И. Труш; на северо-востоке России — А.Н. Котовым, В.С. Томирдиадо; на Европейском Севере — Ю.В. Мудровым, Н.В. Тумель, Ю.Т. Уваркиным; в Забайкалье — Н.А. Шполянкой; в Арктике — Г.Э. Розенбаум и др.

Особенности экзогенных геологических процессов криолитозоны, закономерности их развития, приуроченность к определенным инженерно-геологическим условиям, зональность их проявления, а также особенности форм и размеров вызванных ими явлений рассмотрены в работах перечисленных выше авторов, в пятитомной монографии «Геокриология СССР» [11], в книге «Геокриологические опасности» (2000 г.). Они также отражены на «Геокриологической карте СССР масштаба 1:2 500 000» [10], где наиболее полно для



Рис. Комплексы современных экзогенных геологических процессов, развитых в разных частях Западно-Сибирской плиты. Процессы приурочены к массивам: I — многолетнемерзлых пород, имеющих практически сплошное распространение; II — многолетнемерзлых и талых сильно увлажненных пород; III — талых сильно увлажненных пород; IV — талых умеренно увлажненных пород [55]. Ширина темных полос и пунктирных линий отражает масштаб распространения геологических процессов (пунктир означает локальное распространение)

территории Северной Евразии охарактеризованы пространственные закономерности распространения мерзлотных процессов. Они также отражены и на мелко- и среднемасштабных картах, некоторые из которых были упомянуты ранее.

Районирование криолитозоны (в обзорном масштабе) проведено Л.С. Гарагулей и другими (2000 г.) для выявления условий развития процессов в ее пределах. Этими авторами показано, что характерной чертой геокриологических процессов и явлений является неравномерность их проявления в криолитозоне. Это определяется геолого-геоморфологическими, ландшафтно-климатическими и геокриологическими различиями в ее пределах. Пораженность территории криолитозоны наиболее значительными по интенсивности процессами во всех морфоструктурах существенно сокращается с севера на юг: на севере наиболее опасными для освоения равнинных территорий процессами являются термокарст, заболачивание, термоабразия, термоэрозия, а на юге — морозное пучение пород. В горах на севере преобладают солифлюкция, термоденудация и маломощные курумы, на юге возрастает роль обвально-осыпных и оползневых процессов.

Особенности развития современных мерзлотных процессов и их комплексов подчиняются зональности. Наиболее четко такой характер пространственного распределения их комплексов показал В.Т. Трофимов [42, 55] в пределах обширных пространств Западной Сибири и объяснил это тем, что большинство факторов (таких как характер современной увлажненности и теплообеспеченности, состояние пород и др.), которые определяют особенности развития, распространения и сочетания процессов в пределах тех или иных частей территории, носит зональный характер (рис.).

Динамику развития всех криогенных процессов криолитозоны Л.С. Гарагулей [7] предложено описывать тремя понятиями — циклом, фазой и стадией развития. Фазы и циклы развития связаны с колебательным характером теплообмена. Интенсивная и неинтенсивная фазы связаны с экстремумами колебаний, а циклы — с длиной их периодов. Некоторые процессы, такие как сезонное пучение, морозобойное растрескивание, термоэрозия, солифлюкция и др., характеризуются только сезонными циклами, другие — сочетанием сезонных и многолетних циклов. Процессы с многолетними стадиями развития, такие как термокарст и многолетнее пучение, развиваются непрерывно в течение всего года и на протяжении многих лет. В их динамике отмечают две фазы внутригодового цикла и периодическую смену фаз, соответствующую циклам многолетних колебаний теплообмена. При этом развитие процесса обеспечивается переходом среднегодовой температуры через 0 °С. Все многолетние процессы характеризуются стадиями развития, которые предопределяются в основном геолого-тектоническими и исходными мерзлотными условиями [7]. Различают стадии зарождения, зрелого развития и старения (затухания) процесса. Такая стадийность может нарушаться циклическим характером промерзания и оттаивания, охлаждения и нагревания. Степень нарушения определяется тепловой инерцией мерзлых (талых) пород [9].

Закономерности распространения мерзлых пород и их отображение на картах

Общая схема закономерностей распространения сезонно- и многолетнемерзлых пород была рассмотрена еще в конце первого из описанных ранее этапов исследований в работах В.К. Яновского, В.А. Кудрявцева, А.И. Попова, И.Я. Баранова и др. Но сведения, лежащие в их основе, были достаточно малочисленны, а по многим территориям страны региональных данных практически не было.

Первыми картами, отражающими распространение «вечной мерзлоты», были карты, составленные Л.А. Ячевским (1889 г.), М.И. Сумгиным (1927, 1937 гг.), С.Г. Пархоменко (1937 г.), В.Ф. Тумелем (1946 г.). Несмотря на ограниченное количество фактических данных, эти карты в целом верно отражали зональность распространения многолетнемерзлых пород.

Идея отражения на мерзлотных картах состава мерзлых пород, а также природных факторов, определяющих их характер, принадлежит В.К. Яновскому, В.А. Кудрявцеву, И.Я. Баранову, которые проводили в 1930-е годы крупномасштабные работы для определения условий хозяйственного освоения различных территорий [6].

В.К. Яновским [56] были составлены крупномасштабные мерзлотно-грунтовые карты на различные участки в пределах Воркутинского района и Забайкалья. В.А. Кудрявцевым в 1949 г. [26] были составлены карты температурной зональности и температурного районирования области вечной мерзлоты. А.И. Попов (1953 г.) подразделил области вечной мерзлоты СССР на мерзлотно-геологические районы. На карте подземного оледенения («вечной мерзлоты») СССР им показаны генетические типы подземного льда [35]. Несколько позже А.И. Калабиным [6] была опубликована «Мерзлотно-гидрогеологическая карта северо-востока СССР в масштабе 1:10 000 000».

В 1960 г. И.Я. Барановым [2] была издана первая геокриологическая карта СССР в масштабе 1:10 000 000, в которой был обобщен накопленный к тому времени фактический материал и отражен уровень развития представлений о характере зональных и региональных закономерностей распространения мерзлых толщ.

В 1960–1970 гг. работы геокриологов и инженеров-геологов были направлены на изучение закономерностей распространения, температурного режима, криогенного строения, мощностей многолетнемерзлых пород во всех регионах Советского Союза. В частности, сотрудниками геологического факультета МГУ были созданы мерзлотная и мерзлотно-гидрогеологическая карты Южной Якутии масштаба 1:2 500 000, серия мерзлотных карт Западно-Сибирской плиты и Патомского нагорья масштаба 1:1 000 000, полосы вдоль трассы Байкало-Амурской магистрали масштаба 1:500 000. Были составлены мелко- и среднемасштабные карты (масштабов 1:500 000 и 1:200 000 соответственно) многих районов страны. Ряд мелкомасштабных мерзлотных карт различных территорий был создан в Институте мерзлотоведения СО АН СССР (карты Якутии, Забайкалья, Восточных Саян, Монголии и др.) и в целом ряде других организаций.

Венцом этих исследований было создание пятитомной монографии «Геокриология СССР» [11] и «Геокриологической карты СССР масштаба 1:2 500 000» [10]. Эта карта была составлена по заказу Министерства геологии СССР большим коллективом авторов (главным редактором был Э.Д. Ершов). По своей детальности она не имела и не имеет аналогов в мире. На ней показаны основные характеристики мерзлотных условий и основные мерзлотообразующие факторы.

Серия мерзлотных карт Западно-Сибирской плиты масштаба 1:1 000 000 была составлена в 1982, 1984 и 1985 гг. сотрудниками Тюменской инженерно-геологической экспедиции геологического факультета МГУ под руководством В.Т. Трофимова на средства Главтюменьгеологии, а именно:

- «Карта распространения среднегодовых температур многолетнемерзлых и талых пород»;
- «Карта генетических типов и льдистости верхней 10-метровой части разреза многолетнемерзлых пород»;
- «Карта мощности и строения толщ многолетнемерзлых пород».

Они подробно рассмотрены в работе [49].

В итоге планомерного выполнения региональных исследований и обобщения их результатов в монографических и, главное, картографических работах были изучены и охарактеризованы и региональные, и зональные закономерности распространения толщ мерзлых пород и их характеристик. В частности, доказано, что во всех геолого-структурных регионах характер распространения и особенности строения и состояния мерзлых пород подчиняются широтной геокриологической зональности и высотной геокриологической поясности. Региональные и зональные закономерности распространения многолетнемерзлых пород нашли широкое отражение практически во всех региональных инженерно-геологических материалах по территории криолитозоны, составленных в последней трети XX века. Особенно важно, что характеристики мерзлых толщ стали обязательным компонентом инженерно-геологических карт.

Об отражении показателей мерзлотных условий на обзорных, мелко- и среднемасштабных инженерно-геологических картах

На *обзорных инженерно-геологических картах* мерзлотная обстановка отображалась до 70-х годов прошлого века достаточно схематично. Даже на «*Инженерно-геологической карте СССР масштаба 1:2 500 000*» [18], составленной в 1964 г. (главным редактором которой был М.В. Чуринов), только нанесены границы распространения многолетнемерзлых пород, а в раздел «Современные геологические процессы и явления» включены только такие мерзлотные процессы и явления, как курумы, солифлюкция, пучение, наледи, талики и подземные льды.

Более детально параметры мерзлотной обстановки стали отображать на инженерно-геологических картах в самом конце 60-х — начале 70-х годов XX века. В качестве примера можно привести изданную в 1972 г. «*Инженерно-геологическую карту Западно-Сибирской плиты масштаба 1:1 500 000*» [39], составленную под редакцией Е.М. Сергеева, А.С. Герасимовой, В.Т. Тро-

фимова и Е.Г. Чаповского. На ней показаны границы распространения многолетнемерзлых пород (ММП), в том числе залегающие с дневной поверхности, выделены участки с различными мерзлотными условиями, отображены температуры и мощность ММП, выделены грунты двух градаций льдистости (слабольшедистые ММП с объемной льдистостью связных грунтов до 25–30%, несвязных — до 25%, а также льдистые и сильнольдистые с объемной льдистостью связных грунтов более 30%, несвязных — более 25%). На карте показаны цифрами глубины (м) сезонного протаивания на мерзлых участках и промерзания талых грунтов в естественных условиях (типичных для данного литологического типа пород). Среди современных геологических процессов и явлений отражены крупные бугры пучения, массивы бугристых торфяников (плоскобугристых и выпуклобугристых), участки интенсивного развития термокарста, участки интенсивного развития полигонального рельефа с повторно-жильными льдами. Среди отдельных карт-врезок даны схема распространения и генетические типы мерзлых пород с выделением поясов и зон их распространения.

На более поздней «*Инженерно-геологической карте Нечерноземной зоны РСФСР масштаба 1:1 500 000*», составленной в 1980 году большим коллективом авторов из МГУ, ряда институтов и производственных объединений Министерства геологии РСФСР, мерзлотная обстановка отражена путем выделения районов развития многолетнемерзлых пород с различными их среднегодовыми температурами. Выделены районы: развития ММП со среднегодовыми температурами ниже минус 3 °С (надмерзлотных вод); развития преимущественно ММП со среднегодовыми температурами от минус 1 до минус 3 °С (вод спорадического распространения и надмерзлотных вод); спорадического развития ММП со среднегодовыми температурами от 0 до минус 1 °С (вод спорадического распространения и надмерзлотных вод). Из мерзлотных процессов и явлений показаны гидролакколиты, бугры пучения, бугристые торфяники, термокарстовые формы, районы распространения полигонального рельефа и участки интенсивного развития солифлюкции.

Дальнейшее развитие региональной инженерной геологии способствовало совершенствованию картографирования параметров мерзлотной обстановки на обзорных картах.

В 2010 г. по заданию Федерального агентства «Роснедра» было завершено создание комплекта «*Современная инженерно-геологическая карта территории Российской Федерации масштаба 1:2 500 000*» [23], составленного коллективом сотрудников ВСЕГИНГЕО с привлечением ведущих специалистов МГУ и региональных организаций. Этот комплект включает: «*Карту инженерно-геологических условий территории Российской Федерации масштаба 1:2 500 000*», «*Карту инженерно-геологического районирования территории Российской Федерации масштаба 1:2 500 000*», «*Карту оценки техногенного воздействия на инженерно-геологические условия территории Российской Федерации масштаба 1:10 000 000*» и три дополнительные карты.

Принципиальное отличие «*Карты инженерно-геологических условий...*» из этого комплекта от всех ра-

нее составленных карт такого ранга состоит прежде всего в подробном показе параметров мерзлотных особенностей. Они охарактеризованы на ней через степень сплошности или прерывистости распространения мерзлых толщ по площади и по разрезу, их преимущественные среднегодовые температуры и степень льдистости. На карте обособлены территории:

- развития многолетнемерзлых пород, залегающих с дневной поверхности (сливающейся мерзлоты),
- развития ММП, залегающих ниже глубины сезонного промерзания (несливающейся мерзлоты);
- установленного и предполагаемого развития охлажденных пород, насыщенных криопэгами;
- распространения второго слоя ММП (с опущенной кровлей мерзлоты);
- частого чередования по площади талых и многолетнемерзлых пород со среднегодовыми температурами, близкими к 0 °С;
- различной сплошности ММП.

В качестве дополнительных характеристик мерзлоты указаны мощности мерзлых толщ в конкретных районах, участки развития полигонально-жильных льдов и выходы пластовых льдов. Температуры ММП показаны на карте в следующих интервалах, увязанных со степенью сплошности мерзлоты: ниже минус 5 °С; от минус 3 до минус 5 °С; от минус 1 до минус 3 °С; от 0 до минус 1 °С. Выделены две градации грунтов по степени льдистости: слабольшедистые и льдистые; сильнольдистые и льдистые. Талые и немерзлые грунты разделены на две категории по степени увлажненности.

«Карта инженерно-геологических условий...» обобщила в единой легенде фактический материал о геокриологических условиях России, представленный на «Геокриологической карте СССР масштаба 1:2 500 000», на региональных мерзлотных картах мелкого и среднего масштаба, а также в опубликованных и фондовых материалах последних лет. В идеологическом плане она отразила многие позиции, разработанные инженерами-геологами Московского университета при составлении мелкомасштабных карт.

На «Карте инженерно-геологического районирования...», входящей в рассматриваемый комплект, мерзлотная обстановка зафиксирована через выделение зон и подзон по характеру современного состояния пород верхней части разреза. Обособлены инженерно-геологические зоны (каждая из которых делится на подзоны) следующих трех типов:

- практически сплошного распространения многолетнемерзлых пород (с подзонами: распространения ММП; распространения ледников и ММП);
- совместного распространения многолетнемерзлых и талых пород (с подзонами: массивно-островного распространения ММП; редкоостровного распространения ММП; редкоостровного распространения ледников и ММП);
- распространения талых и немерзлых пород (с подзонами: распространения сильно увлажненных пород в верхней части разреза с массивами увлажненных пород; распространения слабо увлажненных пород в верхней части разреза с массивами увлажненных пород).

На *мелкомасштабных (1:1 000 000; 1:500 000) инженерно-геологических картах* еще в середине 60-х

годов XX века характеристика мерзлотных особенностей стала обязательной. Лидерами в разработке этого вопроса были инженеры-геологи и мерзлотоведы МГУ, ВСЕГИНГЕО и ПНИИИС. Начиная с 1966 г. на инженерно-геологических картах бассейнов рек Надьмы, Пур, Таз, территории Тазовского и Ямальского полуостровов масштаба 1:500 000, а затем и на «Карте инженерно-геологических условий Тюменской области масштаба 1:1 000 000», составленной в 1978 г. коллективом Тюменской экспедиции МГУ под руководством В.Т. Трофимова, параметры мерзлотной обстановки отображались на цветном фоне, отражавшем состав, возраст и генезис первых от поверхности геолого-генетических комплексов. На последней показаны: состояние пород (мерзлое, талое); льдистость (сильнольдистые, льдистые, слабольшедистые). Выделены: территории распространения многолетнемерзлых пород, залегающих с дневной поверхности; участки с широким развитием охлажденных пород. Обособлены территории развития ММП с различными среднегодовыми температурами и мощностью (соответственно):

- ниже минус 7 °С; более 100 м и нередко меньше 50 м;
- от минус 5 до минус 7 °С; более 100 м и нередко меньше 50 м;
- от минус 3 до минус 5 °С; более 100 м;
- от минус 1 до минус 3 °С; преимущественно 50–100 м;
- от 0 до минус 1 °С; преимущественно до 50 м.

Особо выделены участки с частым по площади чередованием талых и многолетнемерзлых пород с температурой, близкой к 0 °С, и мощностью до 10–15 м. Обособлены участки развития несливающейся мерзлоты, когда кровля многолетнемерзлых пород залегает на глубине от 5 до 20 м. Выделены участки развития полигонально-жильных льдов и полигонального рельефа. Показаны глубина сезонного протаивания, типичная для конкретного литологического типа пород, и глубина сезонного оттаивания. Все перечисленные характеристики мерзлых массивов показаны на карте площадными или линейными условными знаками красного цвета.

На мелкомасштабной инженерно-геологической карте масштаба 1:500 000, составленной Н.И. Труш [51] для территории Чульманской впадины (Южная Якутия), характеристика мерзлотной обстановки дается на фоне формаций и геолого-генетических комплексов пород и генетических типов рельефа. Она включает распространение, мощность и температурный режим сезонно- и многолетнемерзлых пород. Выделены территории развития:

- многолетнемерзлых пород преимущественно островного распространения со среднегодовой температурой от 0 до минус 2 °С, мощностью до 50 м, реже до 100 м;
- ММП преимущественно сплошного распространения со среднегодовой температурой и мощностью (соответственно): от 0 до минус 2 °С, до 100 м; от 0 до минус 2 °С, до 200 м; ниже минус 2 °С, 200–400 м и более;
- преимущественно талых пород.

В виде дробей показаны характерные для типичных ландшафтов глубины сезонного протаивания и сезонного промерзания пород (м). Из криогенных явлений на карте значками показаны: наледи; термокарстовые западины и озера; участки бугристо-западного рельефа.

ефа, связанного с вытаиванием повторно-жильных льдов; бугры пучения высотой 1,5 м и более.

Среднемасштабные (а нередко и мелкомасштабные) инженерно-геологические карты составлялись сотрудниками региональных управлений Министерства геологии СССР в соответствии с положениями «Методического руководства по инженерно-геологической съемке масштаба 1:200 000 (1:100 000 — 1:500 000)», разработанного большим коллективом специалистов под эгидой института ВСЕГИНГЕО [31]. В соответствии с типовой легендой на картах отображались следующие параметры мерзлотной обстановки:

- характер площадного распространения многолетнемерзлых пород (сплошного, прерывистого, островного);
- степень льдистости ММП на глубине нулевых годовых амплитуд (сильная, средняя, слабая);
- температура ММП на глубине нулевых годовых амплитуд (от 0 до минус 1; от минус 1 до минус 2; ниже минус 2; от 0 до минус 2 °С);
- сезонное промерзание и протаивание горных пород, показанное в виде дробей (в числителе — номер сезонного протаивания, в знаменателе — номер типа сезонного промерзания по региональной классификации типов СТС-СМС³);
- глубина залегания кровли мерзлых пород, не сливающихся со слоем сезонного промерзания, для участков с глубоко залегающими ММП;

- подземные и поверхностные льды (жильные льды и их размеры по вертикали, пластовые льды и их мощность, наледи многолетние и сезонные), показываемые специальными значками.

Из криогенных процессов и явлений на картах показывались солифлюкция, морозобойное трещинообразование, многолетнее морозное пучение, новообразование многолетнемерзлых пород, термокарст.

Заключение

Таким образом, в статье описаны этапы развития взглядов на роль и задачи изучения мерзлотной обстановки как одного из факторов инженерно-геологических условий. Рассмотрены классические представления мерзлотоведения о мерзлых породах и сложенных ими массивах, закономерности их распространения, используемые в региональной инженерной геологии, положение мерзлых пород в общей инженерно-геологической классификации горных пород. Показаны особенности гидрогеологических условий криолитозоны, пространственные закономерности и динамика развития в ней мерзлотных процессов, их роль в осложнении инженерно-геологических условий. Рассмотрены способы и степень детальности отражения показателей мерзлотной обстановки на обзорных, мелко- и среднемасштабных инженерно-геологических картах. ❖

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бадю Ю.Б.* Криолитология. М.: КДУ, 2010. 528 с.
2. *Баранов И.Я.* Геокриологическая карта масштаба 1:10 000 000. Пояснительная записка. М.: Изд-во Института мерзлотоведения им. В.А. Обручева, 1960.
3. *Братцев Л.А.* Роль мерзлотных условий в проектировании, строительстве и эксплуатации шахт Печорского угольного бассейна. Сыктывкар: Изд-во Коми филиала АН СССР, 1957. 24 с.
4. *Васильчук Ю.К.* Классификация пластовых ледяных залежей / Материалы 4-й Конференции геокриологов России, Москва, МГУ им. М.В. Ломоносова, 7–9 июня 2011 г. Т. 1. М., 2011. С. 283–290.
5. *Васильчук Ю.К.* Повторно-жильные льды: гетероцикличность, гетерохронность, гетерогенность. М.: Изд-во Московского университета, 2006. 404 с.
6. *Гаврилов А.В.* К истории развития комплексного мелкомасштабного мерзлотного картирования в СССР // Вестник Московского университета. Сер. Геология. 1972. № 5. С. 110–113.
7. *Гарагуля Л.С.* Классификация процессов / Основы геокриологии. Часть 4. Динамическая геокриология (под ред. Э.Д. Ершова). М.: Изд-во МГУ, 2001. С. 471–488.
8. *Гарагуля Л.С.* Классификация типов солифлюкции для оценочного картирования территории // Инженерная геология. 1983. № 4. С. 10–17.
9. *Гарагуля Л.С., Пармузин С.Ю.* Признаки оценки устойчивости территории к изменениям природных факторов и техногенным воздействиям в области вечной мерзлоты // Мерзлотные исследования. 1980. № 19. С. 53–59.
10. Геокриологическая карта СССР масштаба 1:2 500 000 / под ред. Э.Д. Ершова. М., 1996.
11. Геокриология СССР (в 5 томах). М.: Недра, 1988–1989.
12. Геокриология СССР. Средняя Сибирь. М.: Недра, 1989. 414 с.
13. ГОСТ 25100-2011. Грунты. Классификация. М.: МНТКС, 2013.
14. ГОСТ 25100-95. Грунты. Классификация. М.: МНТКС, 1996.
15. Грунтоведение / под ред. Е.М. Сергеева. М.: Изд-во Московского университета, 1983. 392 с.
16. Грунтовые толщи Западно-Сибирской плиты / под ред. В.Т. Трофимова. М.: Изд-во МГУ, 1988. 128 с.
17. Инженерная геология СССР (в 8 томах). М.: Изд-во МГУ, 1976–1978.
18. Инженерно-геологическая карта СССР. Масштаб 1:2 500 000 / под ред. М.В. Чуринова. М., 1968.
19. Инструкция по производству комплексной мерзлотно-гидрогеологической и инженерно-геологической съемки масштабов 1:200 000 и 1:500 000. М.: Изд-во МГУ, 1969. 122 с.
20. *Каплина Т.Н.* Закономерности развития криолитогенеза в позднем кайнозое на аккумулятивных равнинах северо-востока Азии: автореф. дис. ... док. геол.-мин. наук. Якутск: Изд-во ИМ СО АН СССР, 1987. 41 с.
21. Карта грунтовых толщ Нечерноземной зоны РСФСР масштаба 1:1 500 000 / под ред. Е.М. Сергеева. М., 1981.

³ СТС — сезонно-талый слой; СМС — сезонно-мерзлый слой.

22. Катасонов Е.М. Типы мерзлых толщ и проблемы геокриологии / Геокриологические и гидрогеологические исследования Сибири. Якутск, 1972. С. 5–16.
23. Круподеров В.С., Трофимов В.Т., Чекрыгина С.Н. Научно-методические подходы и принципы составления современной инженерно-геологической карты России масштаба 1:2 500 000 // Разведка и охрана недр. 2008. № 6. С. 24–26.
24. Кудрявцев В.А. Методика определения динамики мерзлотного процесса при инженерно-геологических исследованиях: автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. М.: Изд-во МГУ, 1944.
25. Кудрявцев В.А. О некоторых проблемах инженерной геологии / Материалы 1-го Международного конгресса по инженерной геологии «Пути дальнейшего развития инженерной геологии» (под ред. Е.М. Сергеева, В.И. Ферронского, М.В. Чуринова). М., 1971. С. 54–61.
26. Кудрявцев В.А. Температура верхних горизонтов вечномерзлой толщи в пределах СССР. Л.-М.: Изд-во АН СССР, 1954. С. 182.
27. Кудрявцев В.А., Полтев Н.Ф., Достовалов Б.Н. и др. Принципы классификации многолетнемерзлых горных пород / Материалы 8-го Всесоюзного межведомственного совещания по геокриологии. Вып. 2. Якутск, 1966.
28. Кудрявцев В.А., Труш Н.И., Кондратьева К.А. Особенности методики мелкокомасштабных инженерно-геологических исследований в области многолетней мерзлоты (на примере Алдано-Тимптонского междуречья Южной Якутии) / Мерзлотные исследования: сборник статей. Вып. 8. М.: МГУ. 1968. С. 3–16.
29. Мерзлотоведение / под ред. В.А. Кудрявцева. М.: Изд-во Московского университета, 1981. 240 с.
30. Методика комплексной мерзлотно-гидрогеологической и инженерно-геологической съемки масштабов 1:200 000 и 1:500 000. М.: Изд-во МГУ, 1970. 353 с.
31. Методическое руководство по инженерно-геологической съемке масштаба 1:200 000 (1:100 000 — 1:500 000). М.: Недра, 1978. 391 с.
32. Основы геокриологии. Часть 3 / под ред. Э.Д. Ершова. М.: Изд-во Московского университета, 1998. 575 с.
33. Основы мерзлотного прогноза при инженерно-геологических исследованиях. М.: Изд-во Московского университета, 1974. 431 с.
34. Полуостров Ямал: инженерно-геологический очерк / под ред. В.Т. Трофимова. М.: Изд-во Московского университета, 1975. 278 с.
35. Попов А.И. Карта подземного оледенения (вечной мерзлоты) на территории севера европейской части СССР и Сибири / Вопросы географического мерзлотоведения и перигляциальной морфологии. М.: Изд-во МГУ, 1962. С. 59–63.
36. Попов А.И. Мерзлотно-геологическое районирование в области вечной мерзлоты в СССР / Информационный сборник о работах географического факультета Московского университета по Международному геофизическому году. № 1. М.: Изд-во МГУ, 1958. 239–264.
37. Романовский Н.Н. Схема подразделения подземных вод области распространения многолетнемерзлых пород / Методика гидрогеологических исследований и ресурсы подземных вод Сибири и Дальнего Востока. Вып. 3. Иркутск: Изд-во СО АН СССР, 1966. С. 28–40.
38. Сергеев Е.М., Герасимова А.С., Трофимов В.Т. Объяснительная записка к инженерно-геологической карте Западно-Сибирской плиты. Масштаб 1:1 500 000. М.: Изд-во МГУ, 1972. 95 с.
39. Сергеев Е.М., Герасимова А.С., Трофимов В.Т., Чаповский Е.Г. Инженерно-геологическая карта Западно-Сибирской плиты масштаба 1:1 500 000 / под ред. Е.М. Сергеева. М.: Изд-во МГУ, 1972.
40. Соломатин В.И. Физика и география подземного оледенения. Новосибирск: ГЕО, 2013. 266 с.
41. Толстихин Н.И. Подземные воды мерзлой зоны литосферы. М.-Л.: Госгеолиздат, 1941. 201 с.
42. Трофимов В.Т. Закономерности пространственной изменчивости инженерно-геологических условий Западно-Сибирской плиты. М.: Изд-во Московского университета, 1977. 280 с.
43. Трофимов В.Т. Грунтовые толщи, признаки их выделения и классификация / Теоретические основы инженерной геологии. Геологические основы. М.: Недра, 1985. С. 128–137.
44. Трофимов В.Т. Инженерно-геологические формации — идея, содержание, подходы и признаки выделения / Труды Научной конференции «Новые идеи в инженерной геологии». М.: Изд-во МГУ, 1996. С. 30–33.
45. Трофимов В.Т. Мерзлотная обстановка как фактор формирования инженерно-геологических условий / Теоретические основы инженерной геологии. Геологические основы. М.: Недра, 1985. С. 260–266.
46. Трофимов В.Т., Баду Ю.Б., Дубиков Г.И. Криогенное строение и льдистость многолетнемерзлых пород Западно-Сибирской плиты. М.: Изд-во МГУ, 1980. 246 с.
47. Трофимов В.Т., Зиангиров Р.С., Королев В.А. Об актуализации ГОСТ 25100-95 и подготовке нового национального стандарта Российской Федерации по классификации грунтов // Инженерные изыскания. 2010. № 11. С. 14–18.
48. Трофимов В.Т., Королев В.А., Вознесенский Е.А., Голодковская Г.А., Васильчук Ю.К., Зиангиров Р.С. Грунтоведение / под ред. В.Т. Трофимова. М.: Изд-во МГУ, 2005. 1024 с.
49. Трофимов В.Т., Красилов Н.С. Инженерно-геологические карты. М.: КДУ, 2007. 384 с.
50. Трофимов В.Т., Фадеев П.И., Кропоткин М.П. и др. Грунтовые толщи Нечерноземной зоны РСФСР / Вопросы инженерной геологии и грунтоведения. Т. 6. М.: Изд-во МГУ, 1983. С. 317–335.
51. Труш Н.И. Инженерно-геологические условия Алданского района Южной Якутии и особенности методики мелкокомасштабных инженерно-геологических исследований в области многолетней мерзлоты: автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. М., 1967.
52. Цытович Н.А. Механика мерзлых грунтов. М.: Высшая школа, 1973. 280 с.
53. Шумский П.А. Основы структурного льдоведения. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 492 с.
54. Шумский П.А. Подземные льды / Основы геокриологии. Часть 1. М.: Изд-во АН СССР, 1959. С. 273–327.
55. Экзодинамика Западно-Сибирской плиты / под ред. В.Т. Трофимова. М.: Изд-во Московского университета, 1986. 245 с.
56. Яновский В.К. К вопросу о методах исследования вечной мерзлоты в целях проектирования инженерных сооружений / Геология и полезные ископаемые Севера СССР. Л.: Изд-во Главсевморпути, 1936. С. 42–77.
57. Яновский В.К. Методы исследования вечной мерзлоты в инженерно-строительных целях. М.: Изд-во АН СССР, 1951.