

ОБЗОР НАУЧНЫХ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ РАБОТ ПО ИЗУЧЕНИЮ МНОГОЛЕТНЕМЁРЗЛЫХ ПОРОД В ЕСТЕСТВЕННЫХ И АНТРОПОГЕННЫХ УСЛОВИЯХ

REVIEW OF SCIENTIFIC PUBLICATIONS AND INDUSTRIAL WORKS DEVOTED TO THE STUDY OF PERMAFROST FORMATIONS IN NATURAL AND ANTHROPOGENIC CONDITIONS

Аннотация. В работе приводится обзор современных исследований криолитозоны, по большей части направленных на изучение деградации многолетнемерзлых пород (ММП). Научные работы позволяют оценить возможные катастрофические последствия в арктических и субарктических зонах связанные с потеплением. Приводится анализ современных научно-технических решений для смягчения последствий развития данной ситуации. Одним из ключевых является геотехнический мониторинг – запись и анализ параметров состояния мёрзлого грунта и конструкций исследуемого объекта. Системный подход позволит применить математическое моделирование для прогнозирования несущей способности фундамента и выйти на новый уровень безопасности в строительстве и эксплуатации объектов, возведённых в зоне распространения ММП.

Abstract. The paper provides an overview of modern studies of the permafrost zone, mainly aimed at studying the degradation of permafrost formations. Scientific work makes it possible to assess the possible catastrophic consequences in the arctic and subarctic zones associated with warming. The analysis of modern scientific and technical solutions to mitigate the consequences of the development of this situation is given. One of the key solutions is geotechnical monitoring - recording and analysis of the parameters of the state of frozen soil and structures of the investigated object. The systematic approach will allow using mathematical modeling to predict the bearing capacity of the foundation and reach a new level of safety in the construction and operation of facilities erected in the permafrost zone.

Ключевые слова: дистанционный мониторинг, термометрия вечномёрзлых грунтов, многолетнемерзлые грунты, потепление климата.

Keywords: remote monitoring, permafrost thermometry, permafrost soils, climate warming.

Цитирование: Шеин А.Н. Обзор научных и производственных работ по изучению многолетнемерзлых пород в естественных и антропогенных условиях / А.Н. Шеин, Я.К. Камнев // Научный вестник Ямало-Ненецкого автономного округа. – 2020. – (108), №3. – С. 42-50. DOI: 10.26110/ARCTIC.2020.108.3.007

Citation: Shein A.N. Review of Scientific Publications and Industrial Works Devoted to the Study of Permafrost Formations in Natural and Anthropogenic Conditions / A.N. Shein, Ya.K. Kamnev // Scientific Bulletin of the Yamal-Nenets Autonomous District. – 2020. – (108), №3. – С. 42-50. DOI: 10.26110/ARCTIC.2020.108.3.007

Введение

Бурное развитие технологий вместе с ростом населения Земли и потребления энергоресурсов толкают человечество к освоению северных (и горных) территорий, недра которых богаты полезными ископаемыми, разработку которых

часто осложняет присутствие многолетнемерзлых пород (ММП). Самое прямое отношение к этому имеет РФ, значительную (60-65%) территорию которой занимает мерзлота. С одной стороны, мёрзлые породы представляют огромный интерес

с научной точки зрения: здесь хорошо сохранились остатки древней флоры и фауны. С другой стороны, помимо труднодоступности северных территорий, такие породы осложняют их освоение из-за возникающих проблем при возведении и дальнейшей эксплуатации инфраструктуры в таких условиях. Эти проблемы возникают не только из-за сложного строения пород, но и ускорившихся в последнее время процессов деградации мерзлоты ввиду потепления климата. Именно поэтому в последние годы бурно развивается научное направление по изучению современного состояния ММП и прогнозированию развития ситуации в зонах вечной мерзлоты.

Первые упоминания о мерзлоте появились в 17-18 веке, а первые исследовательские работы – в конце 19 начале 20 века и, прежде всего, были связаны с изучением закономерностей развития ММП [1,2], которые, в свою очередь, зависят от комплекса теплофизических, геологических и географических условий. С развитием исследований в 1953 г. под руководством профессора В.А. Кудрявцева на геологическом факультете МГУ была открыта первая в мире кафедра мерзловедения (с 1986 г. геокриологии) [3], а в 1983 образовалась Международная ассоциация мерзловедения (IPA) [4].

Представления о влиянии природных условий на развитие многолетнемерзлых толщ сложились исторически в результате борьбы различных взглядов и мнений многих мерзловедов. Одним из первых был М.И. Сумгин, который предложил теорию деградации (отступления) вечной мерзлоты и считал её реликтом ледниковой эпохи. Такую гипотезу подтверждали многочисленные факты: температурные кривые, имеющие минимум ниже подошвы слоя сезонных колебаний; смещение к северу южной границы распространения ММП и др. Но, наряду с этими фактами, неоднократно отмечались обратные процессы – аградация (наступление, рост) мерзлых толщ и понижение их температуры. Это послужило основой для отрицания теории деградации вечной мерзлоты рядом исследователей (Пархоменко, Колосков, и др.), которые считали мерзлоту продуктом современных (последние 3-5 тыс. лет) климатических условий [5, С. 283].

В дальнейшем были разработаны основные исходные положения более общей теории развития мерзлых толщ, вскрывшие правильные и неправильные стороны существовавших примерно до 1950 г. представлений о них [5, С. 285]. Прежде всего «криолитозона возникает, существует и развивается в результате таких специфических условий теплообмена на поверхности земли между атмосферой и почвой, при которых возникают и существуют мерзлые или охлажденные толщи горных пород с нулевой или отрицательной температурой.

Такое положение определяется всем комплексом природных условий (теплофизических, геологических и географических). В результате на поверхности земли и в верхних ее слоях наблюдается множество периодических колебаний температуры с различными периодами и амплитудами, начиная с суточных и годовых и до многолетних (десятки сотен тысяч лет)» [5, С. 287]. Именно поэтому деградации и аградации являются относительно и их нужно относить к определённым отрезкам времени и периодам колебания.

Изучение многолетнемерзлых пород в естественных условиях

В современном мире, как уже говорилось, принято считать, что происходит глобальное потепление и, как следствие, ускорение деградации ММП. В данном случае (на рассматриваемом историческом отрезке времени) это неоспоримый факт. На это указывают множество исследований и наблюдений, проводимых во всём мире.

В первую очередь это подтверждает температурный мониторинг, который ведётся как на метеостанциях, так и в оборудованных скважинах. Сеть термометрических скважин для непосредственного наблюдения за состоянием вечной мерзлоты создана во многих странах. Такие локальные (региональные) наблюдения проводятся в Швейцарских Альпах [6,7] и высокогорных северных районах Китая [8], на Шпицбергене [9], в Северной Америке (Аляска и Канада) [10; 11], в Гренландии [12], в Норвегии [13], в РФ [14] и в других районах присутствия вечной мерзлоты. Всё большее покрытие территорий, занятых вечной мерзлотой, наблюдательными скважинами позволило в начале 1990-х годов организовать глобальную сеть мониторинга криолитозоны (GTN-P – The Global Terrestrial Network for Permafrost). Международная ассоциация мерзловедения (IPA) инициировала объединение для этой программы 12 стран и сотни скважин (TSP – Thermal State of Permafrost), где изучается около 50 параметров, основным из которых является температура. Кроме того, в GTN-P входят площадки мониторинга активного слоя на приполярных территориях (CALM – Circumpolar Active Layer Monitoring) [15]. На основе собираемой информации, которая находится в свободном доступе в сети интернет [16], проведено множество исследований, в том числе прогнозирующие дальнейшее потепление и деградацию ММП [17, 18, 19, 20, 21].

Можно выделить развивающееся в последнее время направление дистанционного мониторинга, который позволяет составлять мерзлотные карты [22] и анализировать динамику термокарстовых процессов в зоне вечной мерзлоты [23, 24]. Озёра и хасыреи хорошо дешифрируются на космических снимках и в сочетании с детальной стратиграфией являются наиболее пригодными индикаторами

климатических изменений. Кроме того, с озёрами и хасыреями напрямую связано научное направление по изучению эмиссии газов при таянии ММП: метана, углекислого газа и других соединений углерода [25, 26, 27]. Все перечисленные исследования указывают на потепление климата в рассматриваемом временном интервале и, как следствие, деградацию вечной мерзлоты. В то же время эмиссия газа может являться как следствием таяния вечной мерзлоты, так и её причиной, потому что по данным некоторых исследований в ММП скрыто огромное количество парниковых газов [28, 29]. Кроме того, существуют и другие естественные источники парниковых газов – вулканы, болота, пожары и другие. Именно поэтому в последнее время возникают споры (как правило, от незнания вопроса) о доминирующем вкладе причин глобального потепления. Но научное сообщество вместе с развитием технологий и методов исследований приводит всё больше доказательств влияния человека, как катализатора и виновника процесса потепления [30].

Изучение многолетнемерзлых пород в антропогенных условиях

Пока исследователи разбираются в причинах и доказывают влияние человека на происходящее потепление, на приполярных территориях происходит деградация ММП, в результате чего возникают катастрофические последствия [31, 32]. Под ударом оказываются целые города, возведённые на вечномерзлых грунтах [33, 34]. В связи с чем возникает необходимость строить модели и делать прогнозы развития ситуации, используя уже имеющийся набор данных. Для этого под руководством Межправительственной группы экспертов по изменению климата (IPCC) [35] разработано множество моделей, используя которые рассчитаны климатические сценарии. Часть из них (CGCM2, CSM-1.4, ECHAM4/OPYC3, GFDL-R30c, HadCM3) были признаны лучшими для оценки изменений климата в субарктической области [36, 37].

Используя предлагаемые сценарии, можно определить температуру, количество осадков и рассчитать мощность сезонно талого слоя (СТС) для необходимых территорий. Полученные таким образом данные позволяют делать исследования, в частности, связанные с изменениями геокриологических условий в результате оттаивания мерзлых пород, которые говорят, что к середине столетия кровля толщи ММП понизится и будет располагаться на глубинах от 3.5 до 6–8 м. Кроме того оттаивание ММП и осадка поверхности приведут к изменению современных ландшафтов [38]. В других работах исследуются социально-экономические последствия изменения климата в районах распространения многолетнемерзлых пород [37, 39], где утверждается, что коренной житель (человек) и животный мир приспособляются к происхо-

дющим изменениям и пока не произошло катастрофических последствий. Однако они могут последовать, если не разрабатывать стратегии для ряда регионов, систем и секторов.

Наиболее значимые с практической, экономической и социальной точки зрения являются работы по прогнозированию устойчивости уже возведённой и планируемой к строительству инфраструктуры на арктических и приарктических территориях – оценке несущей способности многолетнемерзлых грунтов. Этому посвящена целая серия работ [18, 19, 20], где утверждается, что несущая способность грунтов оснований зданий и сооружений за 1990–2010 г. по сравнению с климатической нормой 1960–1990 г. в некоторых районах уменьшилась до 45 %. При текущем тренде потепления климата к 2050 году несущая способность грунтов уменьшится ещё на 25% и более. Проведены оценки потерь бюджетов различных стран от возможных разрушений и эти суммы исчисляются сотнями миллиардов долларов [19, 40]. Если рассматривать РФ, то только в ЯНАО (наиболее подверженный регион в связи с распространением прерывистого типа ММП) стоимость инфраструктурных и жилых объектов, возведённых на ММП, превышает 150 млрд. долларов. Из них по прогнозам учёных больше трети может стать аварийной к середине 21 века. Такие прогнозы и оценки кажутся вполне реальными при рассмотрении текущей ситуации в строительстве и содержании действующей инфраструктуры в криолитозоне.

В работе [41] проводится анализ аварийности и безопасности инфраструктуры в криолитозоне РФ за 2004-2014 гг. В результате выделяется очевидный тренд нарастания аварийности зданий и сооружений в криолитозоне. Стоит сказать, что уже в 2014 г. в старых городах (Якутск, Игарка, Дудинка, Воркута и др.), возведённых в зоне распространения ММП (некоторые из которых продолжают активно развиваться) доля аварийных и деформированных сооружений превысила 50%; в относительно молодых городах (Норильск, Сургут, Алдан и др.) – 25-30%. Катастрофическая ситуация сложилась в г. Чита, где доля аварийных малоэтажных жилых зданий превысила 80%.

Не менее драматическая ситуация в промышленном и линейном строительстве. В работе [42] анализируется текущее состояние (аварийность) дорожной инфраструктуры в российской Арктике и проводится экономическая оценка последствий деградации вечной мерзлоты под влиянием изменений климата на неё. Рассматриваются несколько сценариев развития ситуации в дорожной отрасли РФ, в каждом из которых неизбежна деградация существующей инфраструктуры, а расходы на содержание только действующих объектов составят десятки миллиардов рублей.

Схожие проблемы возникают во всём мире. Таяние ММП приводит к деформациям, и, как следствие, аварийности действующей инфраструктуры на территории Аляски [17, 43], в Канаде [44], в горах на севере Китая [45] и в Европе [46]. Ситуация на этих и других территориях мира, где присутствуют ММП, анализируется, и проводится оценка экономических последствий деградации вечной мерзлоты [40]. Современное состояние инфраструктуры на рассматриваемых территориях не настолько плачевное как в РФ, тем не менее прогнозируемые затраты на содержание инфраструктуры также как и в РФ исчисляются миллиардами долларов.

Необходимость геотехнического мониторинга в Арктике

К сожалению, на данном этапе развития человечества, на климатические изменения мы не в силах повлиять, однако можно избежать последствий таяния ММП в результате этих изменений. Этого можно добиться, применяя планомерное и системное научно-методическое сопровождение всех проектов, реализуемых на мёрзлых грунтах. Тем более, что весь комплекс (инженерные изыскания и проектирование), призванный обеспечить надёжность строительства и эксплуатации зданий и сооружений в области распространения ММП в РФ находится в глубоком кризисе. Современные нормативные документы [47, 48], за редким исключением, составлены не на основе новой информации, а «актуализированы» редактированием старых [49, 50], путём сокращения требований к выполнению наиболее наукоемких работ и исследований в составе инженерных изысканий [51]. Нужно заметить, что зарубежные стандарты [52, 53, 54] не отличаются наукоёмкостью, но в них заложен более значительный запас несущей способности грунтов: 2.5–3 за рубежом вместо 1.05–1.56 в РФ [55].

Очевидно, что учесть все факторы воздействия на вечную мерзлоту в антропогенных условиях крайне сложно. Тем не менее, проведение мониторинга температурного режима грунтов, сложившегося под влиянием этих факторов представляется наиболее очевидным выходом из сложившейся ситуации. Хорошим подспорьем к температурным измерениям могут послужить геофизические исследования, эффективность которых подтверждалось не один раз при подобных работах [8, 44]. Всё это позволит на ранних этапах выявлять начавшиеся негативные изменения в несущей способности грунтов и вовремя на них реагировать.

Для решения этой задачи в северных странах создаются департаменты [56] и составляются стандарты [57]. Под эгидой таких организаций проводятся работы для оценки состояния капитальных сооружений, возведённых в зоне вечной мерзлоты [44; 58]. Результатами этих работ являются рекомен-

дации по восстановлению и поддержанию необходимого для устойчивости сооружения состояния криолитозоны под сооружениями. Помимо зданий и сооружений мониторинг и соответствующие заключения проводятся на линейных инфраструктурных объектах: автомобильные и железные дороги [59, 60, 61].

Мощным импульсом для развития геотехнического мониторинга послужило развитие инфраструктуры топливно-энергетического комплекса (ТЭК) в арктической и субарктической зоне. Особенно это заметно в Российской Федерации, где взрывными темпами развиваются коммерческие автоматизированные системы геотехнического мониторинга на объектах нефтегазового комплекса [62, 63, 64]. Здесь же стали появляться первые прогнозные оценки состояния грунтов [65], которые были основаны по большей части на статистической обработке данных. Всё чаще начали применять математическое моделирование физических процессов теплообмена. Например, в работе [66] рассчитываются температурные поля на промышленном объекте в Якутии, в статье [67] моделируются изменения состояния грунтов под защитным сооружением на берегу реки в северном Китае. Неотъемлемой частью такого моделирования являются теоретические основы процессов теплопереноса. В этом направлении также ведутся работы: исследуется корректность задач по прогнозу динамики температурных полей в основании сооружений на ММП [68], разрабатываются численные алгоритмы для разных моделей процессов теплообмена, в том числе с учётом фильтрации жидкости [69; 70].

Ещё одним важным элементом при изучении тепловых процессов, происходящих в мёрзлых породах, является физическое моделирование. Такие ценные исследования проводятся в лабораториях, а результаты сравниваются с численными расчётами [71; 72]. Ещё более значимыми можно считать исследования, которые проводятся в естественной среде [73], где изучают поведение параметров нетронутой (in situ) мёрзлой породы при её нагреве.

В результате развития теоретической базы, алгоритмов и возможностей для численного моделирования, стали появляться программные продукты для расчёта процесса теплообмена в мёрзлых грунтах, которые позволяют прогнозировать развитие геокриологической обстановки при различных сценариях. Основным драйвером таких работ, как уже говорилось, послужили топливно-энергетические компании. Некоторые программы были предназначены для решения узкого круга задач, но постепенно стали появляться универсальные профессиональные продукты, которые позволяют проводить трёхмерные нестационарные теплотехнические расчёты взаимодействия ММП и инженерных сооружений с учетом

фазовых переходов и фильтрационных свойств грунтов и делать прогнозы тепловых режимов многолетнемерзлых грунтов для заданных условий и при различных сценариях [74; 75; 76].

Несмотря на импульс, созданный ТЭК, строительство капитальных объектов и их содержание на территориях с распространением ММП, в том числе проведение обязательных систематических наблюдений, в РФ регламентируется двумя устаревшими нормативными документами. Первый – это уже упомянутый выше актуализированный свод правил СП 25.13330.2012 [48], а второй – Постановление Госстроя РФ от 27.09.2003 N 170 «Об утверждении Правил и норм технической эксплуатации жилищного фонда» [77]. Первый документ регламентирует проведение температурного мониторинга вечномёрзлых грунтов исключительно жилищного фонда, второй – разработан для всех зданий и сооружений, в том числе подземных инженерных коммуникаций. В них прописано проведение обязательного систематического наблюдения за температурой вечномёрзлых грунтов и положением их верхней границы: продолжительность выполнения мониторинга и периодичность его выполнения. Отрадно, что в действующем СП 25.13330.2012 прописана необходимость геотехнического мониторинга за зданиями, построенными на вечной мерзлоте, на протяжении всего времени его использования. Ключевой параметр – температуру грунтов – необходимо проводить 2 раза в год, в конце летнего периода и в середине зимы. Количество скважин для мониторинга должно быть не менее 2% от общего числа фундаментов (свай, столбчатых фундаментов) (приложение М к СП 25.13330.2012).

Такие нормативы (на один объект 3-4 термометрические скважины) далеко не идеальны и судить о несущей способности всего объёма грунтов под сооружением по такому количеству данных практически невозможно, а если и удаётся зафиксировать изменения, то чаще всего ситуация приобретает необратимый аварийный характер и в любом случае требует дополнительных инженерных изысканий. Более того, следует признать, что даже такие скудные требования зачастую не выполняются или выполняются с грубыми нарушениями как при строительстве, так и при эксплуатации сооружений.

В качестве яркой иллюстрации сложившейся ситуации можно привести г. Салехард – окружную столицу ЯНАО, где свыше 90% территории находится в зоне распространения ММП. Сам город возведён и продолжает активно развиваться на наиболее чувствительной к климатическим и антропогенным изменениям прерывистой мерзлоте. Тем не менее, при осмотре высотных зданий в г. Салехард, многие проветриваемые подполья оказались захлаплены, либо закрыты уже много лет, а существующие термометрические скважины давно заброшены (засыпаны или забиты) и проведение даже регла-

ментированного мониторинга невозможно. С одной стороны, такое отношение связано с достаточно молодым высотным капитальным строительством (первый высотный дом построен в 2009 году), малым износом построенных объектов, и как следствие отсутствием горького опыта катастрофических последствий. Другой причиной можно назвать недостаточное количество квалифицированных кадров для проведения геотехнического мониторинга как в строительных, так и в эксплуатирующих организациях. Но основная причина – это отсутствие санкций к структурам, ответственным за состояние капитальных объектов.

Заключение

Нетрудно представить, что если в дальнейшем не принимать даже минимальных мер по геотехническому мониторингу грунтов оснований и фундаментов, молодые города, возводимые на ММП неизбежно повторят историю более старых, построенных на вечномёрзлых грунтах. Исследование скорости деградации вечной мерзлоты в естественных условиях позволит усовершенствовать стандарты строительства, чтобы инфраструктурные и жилые объекты строились уже с учётом прогнозов будущих изменений грунтов, полученных не на основе априорных моделей, а используя анализ реальных данных с термометрических скважин.

В последнее десятилетие освоение Арктики нефтегазовыми компаниями придало колоссальный аппаратный, научно-методический и технологический импульс системе геотехнического мониторинга, который в последнее время приобретает всё более чёткие контуры: нужен мониторинг в реальном времени и по обоснованной специалистами инженерами-геоокриологами сети скважин, как это сделано на некоторых объектах ТЭК [78]. Такая идея автоматизированного мониторинга в городской среде вынашивалась более трёх лет Научным центром изучения Арктики совместно с коллегами МГУ и в настоящее время апробируется в г. Салехард [79].

Системный подход при геотехническом мониторинге зданий и сооружений, возведённых на мёрзлых грунтах, позволит связать получаемые данные с математическим моделированием тепловых процессов и выйти на точную (насколько это позволит численные расчёты) оценку несущей способности фундамента. Но «сама эта система будет эффективной, если будет опираться как на результаты инженерных изысканий и проектирования, так и на информацию об условиях их реализации (строительства). То есть на сбалансированную последовательную систему: изыскания—проектирование—строительство—эксплуатация (мониторинг)» [51].

Литература

1. Сумгин М.И. Вечная мерзлота почвы в пределах СССР. Изд. 2-е., М. – Л.: Изд-во АН СССР, 1937. 384 с
2. Общее мерзловедение : учебник / М.И. Сумгин [и др.]. М. – Л.: Изд-во АН СССР, 1940. – 340 с.
3. Кафедра геокриологии геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова [официальный сайт] URL: https://geol.msu.ru/ru/struktura_fakulteta/kafedra-geokriologii (дата обращения 22.07.2020)
4. International Permafrost Association [официальный сайт] URL: <https://ipa.arcticportal.org/> (дата обращения 22.07.2020)
5. Общее мерзловедение (геокриология), изд. 2. Учебник. / Под ред. В.А. Кудрявцева. – М.: Изд-во МГУ, 1978. – 464 с.
6. Noetzi, J., Pellet, C. and Staub, B. PERMOS 2019. Permafrost in Switzerland 2014/2015 to 2017/2018. Glaciological Report Permafrost No. 16–19 of the Cryospheric Commission of the Swiss Academy of Sciences. 104 pp. doi:10.13093/permos-rep-2019-16-19 [электронный ресурс] URL: <http://www.permos.ch/downloads/permos15-18.pdf> (дата обращения 22.07.2020)
7. R. Luethi and M. Phillips Challenges and solutions for long-term permafrost borehole temperature monitoring and data interpretation // *Geogr. Helv.* – 2019. – 71. – P. 121-131
8. Influence of urbanization on permafrost: a case study from Mohe County, northernmost China/ W.B. Yu, M. Guo, L. Chen, Y.M. Lai, X. Yi, and L.L. Xu // *The Cryosphere Discuss.* – 2014. – vol. 8 – P. 4327–4348.
9. Permafrost thermal snapshot and active-layer thickness in Svalbard 2016–2017 / H.H. Christiansen, G.L. Gilbert, N. Demidov, M. Guglielmin, K. Isaksen, M. Osuch, J. Voike [электронный ресурс] URL: https://sios-svalbard.org/sites/sios-svalbard.org/files/common/SESS_2018_01_PermaSval.pdf (дата обращения 22.07.2020)
10. A.E. Klene, K.M. Hinkel, F.E. Nelson The Barrow Urban Heat Island Study: soil temperatures and active-layer thickness // *Proceedings of the eighth international conference on permafrost.* – 2003. – Zurich, Switzerland. – P. 555-560
11. Thermal state of permafrost in North America: a contribution to the international polar year / Smith, S. L., Romanovsky, V. E., Lewkowicz, A. G., Burn, C. R., Allard, M., Clow, G. D., Yoshikawa, K., and Throop, J. // *Permafrost and Periglacial Processes.* – 2010 – Vol. 21. – Issue 2. – P. 117-135. DOI:10.1002/ppp.690.
12. High-Resolution Permafrost Simulations in Western Greenland and an Assessment of Permafrost Degradation Risk / M. Stendel, J. H. Christensen, S. Marchenko, R. Daanen, V. Romanovsky // *Geophysical Research Abstracts* – 2013. – Vol. 15. – EGU General Assembly. – P. 401-406
13. NORPERM, the Norwegian Permafrost Database – a TSP NORWAY IPY legacy/ Juliussen, H., Christiansen, H. H., Strand, G. S., Iversen, S., Midttømme, K., and Rønning, J. S. // *Earth Syst. Sci. Data.* – 2010. – 2 – P. 235–246. DOI: 10.5194/essd-2-235-2010
14. Thermal State of Permafrost in Russia / V.E. Romanovsky, D.S. Drozdov, N.G. Oberman, G.V. Malkova, A.L. Kholodov, S.S. Marchenko, N.G. Moskalenko, D.O. Sergeev, N.G. Ukraintseva, A.A. Abramov, D.A. Gilichinsky and A.A. Vasiliev // *Permafrost and Periglacial Processes.* – 2010. – Vol 21. – Issue 2. – P. 136–155. DOI: 10.1002/ppp.683
15. The new database of the Global Terrestrial Network for Permafrost (GTN-P) / Biskaborn B.K., Lanckman J.-P., Lantuit H., Elger K., Streletskiy D.A., Cable W.L., Romanovsky V.E. // *Earth Syst. Sci. Data.* – 2015. – 7. – P. 245–259.
16. The Global Terrestrial Network for Permafrost (GTN-P) [официальный сайт] URL: <https://gtnp.arcticportal.org/> (дата обращения 22.07.2020)
17. Romanovsky V.E. & Osterkamp T.E. Permafrost: Changes and impacts / In R. Paepe & V. Melnikov (eds), *Permafrost Response on Economic Development, Environmental Security and Natural Resources.* – Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2001. – P. 297–315.
18. Стрелецкий Д.А., Шикломанов Н.И., Гребенец В.И. Изменение несущей способности мёрзлых грунтов в связи с потеплением климата на севере Западной Сибири // *Криосфера Земли.* – 2012. – Т. XVI. – №1. – С. 22-32.
19. Assessment of climate change impacts on buildings, structures and infrastructure in the Russian regions on permafrost / D.A. Streletskiy, L.J. Suter, N.I. Shiklomanov, B.N. Porfiriev and D.O. Eliseev // *Environ. Res. Lett.* – 2019. – Vol. 14 – №2. – 025003. DOI: 10.1088/1748-9326/aaf5e6
20. Degrading permafrost puts Arctic infrastructure at risk by mid-century / J. Hjort, O. Karjalainen, J. Aalto, S. Westermann, V.E. Romanovsky, F.E. Nelson, B. Etzelmüller, M. Luoto // *Nature Communications.* – 2018. – Vol. 9. – 5147. DOI: 10.1038/s41467-018-07557-4
21. Statistical Forecasting of Current and Future Circum-Arctic Ground Temperatures and Active Layer Thickness / J. Aalto, O. Karjalainen, J. Hjort, M. Luoto // *Geophysical Research Letters.* – 2018. – Vol. 45 – Issue 10. – P. 4889-4898. DOI: 10.1029/2018GL078007
22. An effective approach for mapping permafrost in a large area using subregion maps and satellite data / Jianan Hu, Shuping Zhao, Zhuotong Nan, Xiaobo Wu, Xuehui Sun, Guodong Cheng // *Permafrost and Periglacial Process.* – 2020. – P. 1–13. DOI: 10.1002/ppp.2068
23. Paleolimnology of thermokarst lakes: a window into permafrost landscape evolution / F. Bouchard, L.A. MacDonald, K.W. Turner, B.K. Biskaborn,

- J.R. Thienpont, A.S. Medeiros // *Arctic Science*. – Vol.3. – 2017 – P.91-117. DOI: 10.1139/as-2016-0022
24. Прейс Ю.И., Симонова Г.В., Слагода Е.А. Детальная стратиграфия и динамика хасырея Центрального Ямала в верхнем голоцене // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2016. – Т. 327. – №10. – С. 35–49.
25. 21st-century modeled permafrost carbon emissions accelerated by abrupt thaw beneath lakes / K. Walter Anthony, T.S.v. Deimling, I. Nitze, S. Frolking, A. Emond, R. Daanen, P. Anthony, P. Lindgren, B. Jones, G. Grosse // *Nature Communications*. – Vol. 9. 3262. DOI: 10.1038/s41467-018-05738-9, 2018
26. Hobbie S.E., Nadelhoffer K.J., Högberg P. A synthesis: the role of nutrients as constraints on carbon balances in boreal and arctic regions // *Plant and Soil*. – 2002. – Vol. 242. – P. 163–170. DOI: 10.1023/a:1019670731128.
27. Fritz S.C. and Anderson N.J. The relative influences of climate and catchment processes on Holocene lake development in glaciated regions // *Journal of Paleolimnology*. – 2013. – Vol. 49. – P. 349–362. DOI: 10.1007/s10933-013-9684-z
28. Michiel H. in 't Zandt, Susanne Liebner, and Cornelia U. Welte Roles of Thermokarst Lakes in a Warming World // *Trends in Microbiology*. – 2020. DOI: 10.1016/j.tim.2020.04.002
29. Methane bubbling from Siberian thaw lakes as a positive feedback to climate warming / K.M. Walter, S.A. Zimov, J.P. Chanton, D. Verbyla, F.S. Chapin III // *Nature*. – 2006. – Vol. 443. – P. 71–75. DOI: 10.1038/nature05040
30. Cenozoic sea-level and cryospheric evolution from deep-sea geochemical and continental margin records / K.G. Miller, J.V. Browning, W.J. Schmelz, R.E. Kopp, J.S. Mountain, J.D. Wright // *Science Advances* – 2020. – Vol. 6. – №20. – eaaz1346. DOI: 10.1126/sciadv.aaz1346
31. «Катастрофа для Арктики». Что известно о разливе топлива в Норильске / BBC News [Электронный ресурс]: [bbc.com/russian](https://www.bbc.com/russian/features-52926977) URL: <https://www.bbc.com/russian/features-52926977> (дата обращения 22.07.2020)
32. Восемь домов в Норвегии унесло в океан вместе с огромным куском суши / *National Geographic Россия* [Электронный ресурс]: <https://nat-geo.ru/> URL: <https://nat-geo.ru/accidents/vosem-domov-v-norvegii-uneslo-v-okean-vmeste-s-ogromnym-kuskom-sushi-video/> (дата обращения 22.07.2020)
33. С.С. Порошина Растепление вечномёрзлых грунтов под зданиями в Норильске // *Градостроительство и архитектура*. – 2018. – Т. 8. – № 2. – С. 65-70
34. О проблемах градостроительства в криолитозоне (на примере Якутска) / О.И. Алексеева, В.Т. Балобаев, М.Н. Григорьев, В.Н. Макаров, Р.В. Чжан, М.М. Шац, В.В. Шепелев // *Криосфера Земли*. – 2007. – т. XI. – №2. – С. 76–83
35. Intergovernmental Panel on Climate Change [официальный сайт] URL: <https://www.ipcc.ch/> (дата обращения 22.07.2020)
36. Data Distribution Centre of IPCC [Электронный ресурс] URL: <https://www.ipcc-data.org/sim/index.html> (дата обращения 22.07.2020)
37. Анисимов О.А. Основные природные и социально-экономические последствия изменения климата в районах распространения многолетне-мерзлых пород: прогноз на основе синтеза наблюдений и моделирования. – Москва: Гринпис, 2010. – 44 с.
38. Ривкин Ф.М., Власова Ю.В., Пармузин И.С. Закономерности изменения геокриологических условий в результате осадки мерзлых пород при оттаивании // *Криосфера земли*. – 2017. – Том XXI. – № 6. – С. 26-34
39. Свинобоев А. Н., Неустроева А. Б. Изменение климата и условий жизни на Севере в восприятии коренного населения // *Урбанистика*. – 2017. – № 4. – С. 28 – 39. DOI: 10.7256/2310-8673.2017.4.24619
40. Luis Suter, Dmitry Streletskiy & Nikolay Shiklomanov Assessment of the cost of climate change impacts on critical infrastructure in the circumpolar Arctic // *Polar Geography*. – 2019. – Vol. 42. – Issue 4. – P. 267-286. DOI: 10.1080/1088937X.2019.1686082
41. Кроник Я. А. Анализ аварийности и безопасности геотехнических систем в криолитозоне // *Материалы V конференции геокриологов России*. МГУ им. М. В. Ломоносова. М.: Университетская книга, 2016. – Т. 1. – С. 104-113
42. Б.Н.Порфирьев, Д.О.Елисеев, Д.А.Стрелецкий Экономическая оценка последствий деградации вечной мерзлоты под влиянием изменений климата для устойчивости дорожной инфраструктуры в российской Арктике // *Вестник Российской Академии Наук*. – 2019. – Т. 89. – № 12. – С. 1228-1239
43. A.M Melvin, P. Larsen, B. Boehlert, J.E. Neumann, P. Chinowsky, X. Espinet, J. Martinich, M.S. Baumann, L. Rennels, A. Bothner, D.J Nicolsky, S.S Marchenko Climate change damages to Alaska public infrastructure and the economics of proactive adaptation // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. – 2017. – 114(2). – E122-E131. DOI:10.1073/pnas.1611056113
44. Calmels F.B., Horton L.P., Roy P. Lipovsky and B. Benkert. Assessment of Risk to Infrastructure from Permafrost Degradation and a Changing Climate, Ross River. Northern Climate Exchange, Yukon Research Centre, Yukon College. – 2016. – 88 p.
45. Characteristics of Asphalt Pavement Damage in Degrading Permafrost Regions: Case Study of the Qinghai–Tibet Highway, China / Mingtang Chai, Yanhu Mu, Jianming Zhang, Wei Ma, Ge Liu, Jianbing Chen // *J. Cold Reg. Eng.* . – 2018. – Vol. 32. – Issue 2. – 05018003
46. Recent evolution of damage to infrastructure on permafrost in the French Alps / P Duvillard, L. Ravel, M. Marcer, P. Schoeneich // *Regional Environmental Change*. – 2019. – Vol. 19. – P. 1281-1293.

DOI: 10.1007/s10113-019-01465-z

47. ГОСТ 19804-2012 Сваи железобетонные заводского изготовления. Общие технические условия / Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации (МГС). – М.: Стандартиформ, 2014 – 20 с.
48. СП 25.13330.2012 Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. Актуализированная редакция СНиП 2.02.04-88 / Министерство регионального развития РФ. – М., 2012. – 118 с.
49. ГОСТ 19804.1-79 Сваи забивные железобетонные цельные сплошного квадратного сечения с ненапрягаемой арматурой. Конструкция и размеры / Государственные стандарты союза ССР. – М.: Издательство стандартов, 1980. – 24 с
50. СНиП 2.02.04-88. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах / Госстрой России. – М.: ГУП ЦПП, 2005. – 52 с.
51. Ривкин Ф.М. Изменения геокриологических условий в основаниях зданий и сооружений в Арктике и Субарктике // Вестник инженерных изысканий. – 2020. – №6 (45). – С. 18-22
52. CSA PLUS 4011:19 Technical Guide: Infrastructure in permafrost: A guideline for climate change adaptation / Canadian Standards Association. – 2019. – 92 p.
53. EN 1990 (2002) (English): Eurocode - Basis of structural design [Authority: The European Union Per Regulation 305/2011, Directive 98/34/EC, Directive 2004/18/EC] / european committee for standardization, 2002 – 116 p.
54. Joint Departments of the Army and the Air Force, USA, Technical Manual TM 5-85224/AFM 88-19, Chap. 4. Arctic and Subarctic Construction, Foundations for Structures, 15 October 1983 / Unified facilities criteria (UFC), 2004. – 272 p.
55. Shur Y.L., Goering D.J. Climate change and foundations of buildings in permafrost regions // Permafrost Soils. – 2009. – vol. 16. – P. 251–260. DOI: 10.1007/978-3-540-69371-0_17
56. Department of Infrastructure, Government of Northwest Territories [официальный сайт] URL: <https://www.inf.gov.nt.ca/en> (дата обращения 22.07.2020)
57. Moderating the effects of permafrost degradation on existing building foundations // CAN/CSA-S501-14 / Canadian Standards Association. – 2019. – 55 p.
58. Bommer, C.; Phillips, M.; Keusen, H.-R.; Teyssere, P. Bauen im Permafrost: Ein Leitfaden für die Praxis. – 2009. – 127 p.
59. Bowen Tai, Qingbai Wu, Zhongqiong Zhang, Xiaoming Xu Cooling performance and deformation behavior of crushed-rock embankments on the Qinghai-Tibet Railway in permafrost regions // Engineering Geology. –2020.– 265. – 105453
60. Варламов С.П. Тепловое состояние грунтов в зоне влияния железной дороги в Центральной Якутии // Вестник СВФУ. Серия «Науки о Земле». – 2019. – № 1 (13) – С. 36-47.
61. M. Idrees, C.R. Burn, J.L. Moore, F. Calmels Monitoring permafrost conditions along the Dempster Highway // Proceedings of the 68th Canadian Geotechnical Conference and the 7th Canadian Permafrost Conference. – 2015. –QC, Canada.
62. Система температурного мониторинга мерзлых, промерзающих и протаивающих грунтов [Электронный ресурс] / АО «Научно-производственное предприятие «Эталон»: <https://omsketalon.ru> URL: <https://omsketalon.ru/catalog/sistema-temperaturnogo-monitoringa-merzlyh-promerzayushchih-i-protaivayushchih-gruntov> (дата обращения 22.07.2020)
63. Геотехнический мониторинг [Электронный ресурс] / ООО «АрхГеоком»: <http://arhgeo.com> URL: <http://arhgeo.com/home/geo/geotechnics/>
64. Геотехнический мониторинг и инженерная защита [Электронный ресурс] / ООО «ПермафростИнжиниринг» <http://permafrost-engineering.com/> URL: <http://permafrost-engineering.com/geotekhnicheskij-monitoring-i-inzhener/>
65. Стрижков С.Н., Скорбилин Н.А. Мониторинг как критерий оценки надежности объектов с системами температурной стабилизации грунтов // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – 2012. – №1. – С. 10-17
66. Курилко А.С., Хохолов Ю.А., Дроздов А.В., Соловьев Д.Е. Геотермический контроль грунтов основания копров и устьевой части вертикальных стволов на примере алмазодобывающего рудника “Удачный” (Якутия) // Криосфера Земли. – 2017. – т. XXI. – №5. – с. 82–91
67. Analysis of thermal regime under riverbank in permafrost region / Hu Zhang, Jianming Zhang, Enliang Wangb, Mingyi Zhang, Zhilong Zhang, Mingtang Chai // Applied Thermal Engineering. – 2017. –Vol. 123. – P. 963–972
68. Горелик Я.Б., Паздерин Д.С. Корректность постановки и решения задач по прогнозу динамики температурных полей в основании сооружений на многолетнемерзлых грунтах // Криосфера Земли. – 2017. – т. XXI. – № 3. – С. 49–59
69. Башуров Вл.В., Ваганова Н.А., Филимонов М.Ю. Численное моделирование процессов теплообмена в грунте с учетом фильтрации жидкости // Вычислительные технологии. – 2011. – Т. 16. – №4. – С. 3–19.
70. Filimonov M.Yu., Vaganova N.A. Simulation of Technogenic and Climatic Influences in Permafrost // Lecture Notes in Computer Science. – 2015. – V.9045. – P. 178-185. – DOI:10.1007/978-3-319-20239-6_18
71. Математическое моделирование искусственного замораживания грунтов / П.Н. Вабищевич, М.В. Васильева, В.Ф. Горнов, Н.В. Павлова // Вычислительные технологии. – 2014. – Том 19. – №4. – С.19-31
72. Heat advection in the active layer of permafrost:

Physical modelling to quantify the impact of subsurface flow on soil thawing / Veuille S, Fortier D, Verpaelst M, Grandmont K, Charbonneau S. // Proceedings of the 68th Canadian Geotechnical Conference and the 7th Canadian Permafrost Conference. – 2015. – QC, Canada.

73. Permafrost Degradation and Subsidence Observations during a Controlled Warming Experiment / A.M. Wagner, N.J. Lindsey, S. Dou, A. Gelvin, S. Saari, C. Williams, I. Ekblaw, C. Ulrich, S. Borglin, A. Morales, J. Ajo-Franklin // Scientific Reports. – 2018. – vol. 8. – 10908.

74. FROST 3D Программный комплекс для тепловых расчетов грунтов [Официальный сайт] URL: <https://frost3d.ru/> (дата обращения 22.07.2020)

75. Программный комплекс «Permafrost 3D» [Электронный ресурс] / ООО «ПермафростИнжиниринг» <http://permafrost-engineering.com/> URL: <http://permafrost-engineering.com/permafrost-3d/>

(дата обращения 22.07.2020)

76. ПО «Борей 3D» [Официальный сайт] URL: <https://www.boreas3d.ru/>

77. Постановление Госстроя РФ от 27.09.2003 N 170 «Об утверждении Правил и норм технической эксплуатации жилищного фонда» [Электронный ресурс] / КонсультантПлюс: <http://www.consultant.ru/> URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_44772/ (дата обращения 22.07.2020)

78. Автоматизированная система сбора и передачи данных ГТМ [Электронный ресурс] / ООО «АрхГеоком»: <http://arhgeo.com> URL: <http://arhgeo.com/home/geo/data/> (дата обращения 22.07.2020)

79. Дистанционный контроль за температурным режимом вечномёрзлых грунтов под зданиями г. Салехард / А.Н. Громадский, С.В. Арефьев, Н.Г. Волков, Я.К. Камнев, А.И. Синицкий // Научный вестник ЯНАО. – 2019. – №3. – С. 17-21

Сведения об авторах:

Шейн Александр Николаевич, 1981 г.р., закончил механико-математический факультет НГУ, в 2010 г. защитил кандидатскую диссертацию. ГКУ ЯНАО «Научный центр изучения Арктики» (Салехард, Россия), ведущий научный сотрудник сектора криосферы, к.ф.-м.н. Сфера научных интересов: численное моделирование электромагнитных и температурных полей, криолитозона, геотехнический мониторинг, импульсная электроразведка, электротомография, георадиолокация, процессы вызванной поляризации. E-mail: SheinAN@ipgg.sbras.ru

Камнев Ярослав Константинович, 1987 г.р., закончил физический факультет НГУ, в 2016 г. защитил кандидатскую диссертацию. ГКУ ЯНАО «Научный центр изучения Арктики» (Салехард, Россия), заведующий сектором криосферы, к.ф.-м.н. Сфера научных интересов: криолитозона, геотехнический мониторинг, импульсная электроразведка, электротомография, георадиолокация. E-mail: KamnevYK@gmail.com

Information about the authors:

Shein Alexandr Nickolaevich was born in 1981, graduated from the Faculty of Mechanics and Mathematics of the Novosibirsk State University, and in 2010 he defended his PhD thesis. Leading researcher of the Cryosphere Sector of the Arctic Research Center of the Yamal-Nenets Autonomous District (Salekhard, Russia), Candidate of Physico-Mathematical Sciences. Research interests: numerical modeling of electromagnetic and temperature fields, cryolithozone, geotechnical monitoring, transient electromagnetics, electrical resistivity tomography, ground penetrating radar, induced polarization. E-mail: SheinAN@ipgg.sbras.ru

Kamnev Yaroslav Konstantinovich was born in 1987, graduated from the Faculty of Physics of the Novosibirsk State University, and in 2016 he defended his PhD thesis. Head of the Cryosphere Sector of the Arctic Research Center of the Yamal-Nenets Autonomous District (Salekhard, Russia), Candidate of Physico-Mathematical Sciences. Research interests: cryolithozone, geotechnical monitoring, transient electromagnetics, electrical resistivity tomography, ground penetrating radar. E-mail: KamnevYK@gmail.com