

Современная динамика многолетнемерзлых пород (основные причины и мониторинг)

Шац Марк Михайлович

Ведущий научный сотрудник Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН,
к.г.н.

mmshatz@mail.ru

В статье показана актуальность изучения основных тенденций современной динамики многолетнемерзлых пород и масштабов ее последствий. Это явление обычно сопровождается фазовыми переходами находящихся в мерзлых толщах горных пород вод и приводит к изменениям их свойств и утрате прочности и монолитности. Освещены основные особенности территории развития мерзлых пород, обычно называемой криолитозоной и являющейся специфической составляющей природной среды. Специфика этого верхнего слоя земной коры заключается в отрицательной температуре слагающих его пород и наличии подземных льдов различного генезиса, определяющих его высокую динамичность. Из многочисленных причин преобразования мерзлых толщ две являются основными: климат и техногенез.

В начале нашего века у большинства специалистов сформировались новые и более объективные и обоснованные представления об истинном соотношении техногенных и естественных факторов, обуславливающих тенденции динамики ММП. Одними из первых эти соображения поддержали мерзлотоведы Институты криосферы Земли СО РАН (г. Тюмень) и мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН (г. Якутск). Также в данном материале освещены основные подходы к мониторингу состояния ММП и экономические аспекты их деформации.

Введение

Изучение основных тенденций современной динамики многолетнемерзлых пород (ММП) и масштабов ее последствий является одной из главных проблем геоэкологии. Мерзлые толщи горных пород – один из наименее устойчивых компонентов природной среды, в процессе своей трансформации резко меняющий состав и свойства. Это явление может сопровождаться фазовыми переходами находящихся в них вод и приводить к утрате прочности и монолитности толщи горных пород.

Территория развития ММП, обычно называемая криолитозоной, является специфической составляющей природной среды. Это верхний слой земной коры, характеризующийся отрицательной температурой пород и наличием подземных льдов различного генезиса. Ее мощность достигает глубины до 1,5 км и более, а территория развития составляет около 65% площади РФ (рис. 1) [4].

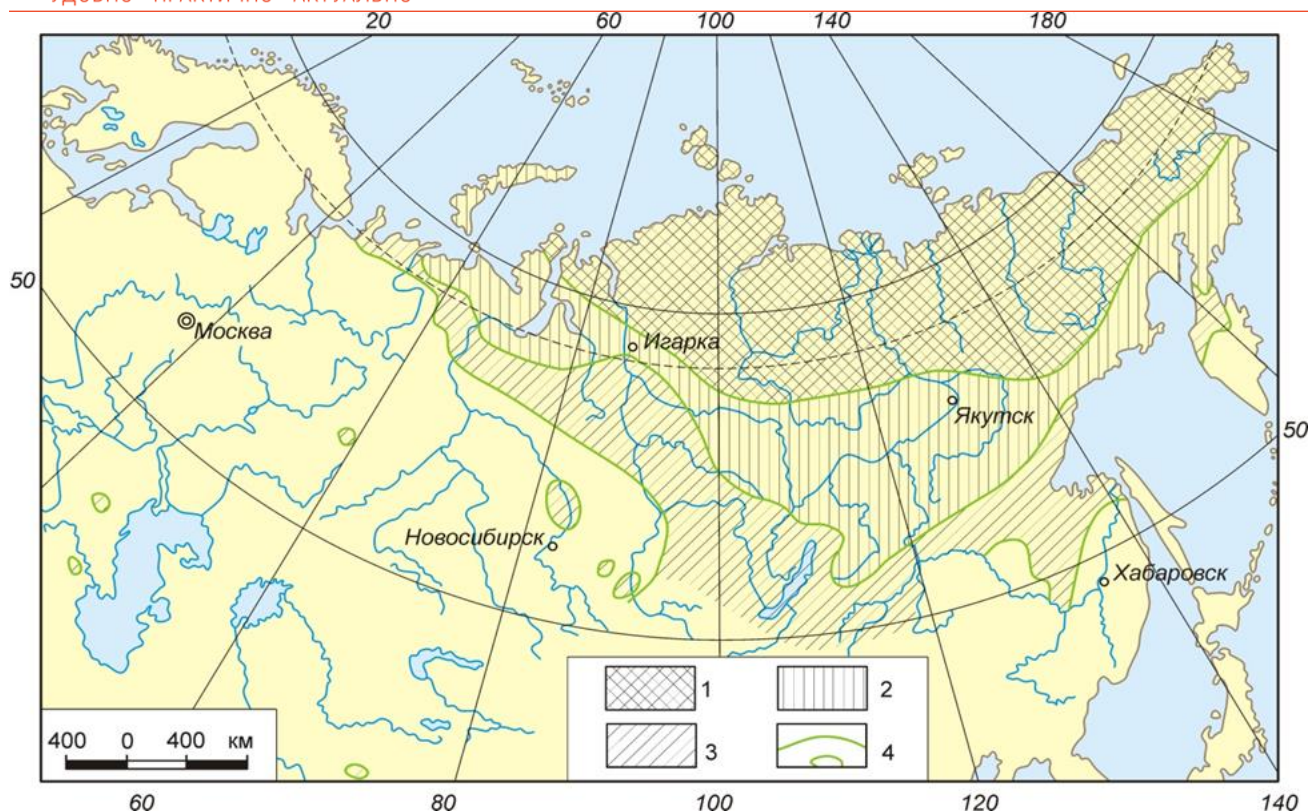


Рис. 1. Схематическая карта распространения вечной мерзлоты и преобладающих температур вечномерзлой толщи [1]

Условные обозначения:

- 1 – районы сплошной вечной мерзлоты с температурами на глубине 10–15 м от -10° до -5°C ;
- 2 – районы с таликами и температурами грунта на глубине 10–15 м от -5° до $-1,5^{\circ}\text{C}$;
- 3 – районы с преобладанием таликов (на юге только острова вечной мерзлоты) и с температурами грунта на глубине 10–15 м выше $-1,5^{\circ}\text{C}$;
- 4 – граница области и островов вечной мерзлоты.

К категории многолетнемерзлых принято относить горные породы, температура которых на подошве слоя годовых колебаний, т.е. на глубине около 10–15 м, на протяжении более 2–3 лет отрицательна. Под талыми, т.е. ранее промерзшими, а позднее оттаявшими горными породами, обычно понимаю те из них, температура которых выше 0°C . Толщи ММП, в которых породообразующим минералом является лед (рис. 2), определяют своеобразие физических и химических процессов в земной коре, проявляющиеся в термике литосферы, в ее геохимической зональности, в физических свойствах пород и протекающих в них геологических процессах. Мерзлота обуславливает и повышение сейсмичности в областях своего развития, представляя из себя «прочную плиту», колебания которой передаются гораздо интенсивнее и обширнее по сравнению с территориями, где ММП отсутствуют.



Рис. 2. Подземные льды в берегах арктических морей Якутии. Фото М.Н. Григорьева

Для криолитозоны характерна особая чувствительность к внешним воздействиям и ранимость, причем это относится как к естественным процессам, так и к техногенезу. Неустойчивые к колебаниям температуры мерзлые толщи легко переходят в талое состояние и наоборот – из талого в мерзлое. Это приводит к развитию неблагоприятных и опасных геокриологических явлений, негативно воздействующих как на естественную природную среду, так и на инженерно-технические системы.

Своеобразные свойства криолитозоны, обусловленные особенностями ее состава (наличие льда), определяют ее высокую динамичность. Поэтому основная цель настоящей статьи – показать специфику криолитозоны, основные факторы ее формирования и динамичности, масштабы и степень последствий трансформации.

Основные причины современной динамики ММП

Анализ современных представлений по рассматриваемой проблеме позволяет из многочисленных причин преобразования мерзлых толщ выделить две основные: климат и техногенез.

Климат

Вся история климатического развития нашей планеты представляет собой систематическое чередование периодов потепления-похолодания в приземных слоях атмосферы, обусловленных разными причинами. Все эти периоды, в зависимости от активности и интенсивности источника теплового воздействия, имели различные продолжительность и амплитуду. Обсуждаемое потепление климата во второй половине XX и начале XXI веков

обусловлено тремя разнопериодными источниками, максимумы которых совпали по фазе и наложились друг на друга [2,3]. В результате за последние полвека в Центральной Якутии потеплело на 2,0–3,3 °С.

Ранее было показано [22,23], что динамика современного климата, ее основные тенденции, влияние на ММП и состояние геотехнических объектов в криолитозоне являются принципиальной проблемой, мнения по которой существенно отличаются. Если в конце прошлого и самом начале настоящего веков существовало почти единодушное мнение об основной тенденции динамики, выражающейся в потеплении климата, даже именуемого глобальным, то в последнее десятилетие представления радикально изменились. Особый интерес представляют результаты изучения реакции на изменения климата одного из наименее стабильных компонентов природной среды – ММП. Эта проблема стала перед мерзлововедами практически с момента становления геокриологии как науки и не потеряла актуальности до сих пор. Проблема имеет несколько аспектов, в том числе и изменение свойств и морфологии мерзлых толщ при различных сценариях изменения климата.

По прогнозу межправительственной группы экспертов (IPCC) и данным оценочных докладов Росгидромета, в XXI в. глобальная температура воздуха может повыситься на 1–2 °С, среднегодовая температура воздуха на территории криолитозоны России в 2041–2060 гг. – на 1,9–3,3 °С [12]. Температура холодного периода возрастет предположительно на 2,6–4,2 °С, летняя – на 1–2 °С. Максимальное повышение температуры воздуха ожидается в арктическом регионе и может привести к деградации многолетнемерзлых толщ, создав тем самым серьезные проблемы. Резкая активизация деструктивных криогенных процессов: термоденудации, термокарста, термоэрозии на территории развития пород ледового комплекса в государствах Арктики во второй половине XXI века приведет к активному таянию и деградации массивов подземных льдов в верхних горизонтах ММП. Именно их масштабное оттаивание, вероятно, может стать одним из основных последствий климатических изменений в Арктике.

Существует два основных мнения о тенденциях и причинах изменения современного климата [22,23], суть которых сводилась к следующему. Сторонники первой точки зрения, сформировавшейся в конце XX века, считали процесс потепления следствием антропогенной деятельности и одной из главных, если не основной, причин ухудшения инженерно-геологических условий и последующих, происходящих на российском Севере деформаций и обрушений геотехнических объектов [1]. В обзорной работе [12] отмечено, что по данным наблюдений на 455 метеостанциях были рассчитаны вековые региональные тренды изменения температуры воздуха. В 1900–2004 гг. средние тренды по России составили 1,1 °С для среднегодовой, 1,7 °С – для зимней и 0,6 °С – для летней температуры воздуха за 100 лет с заметными региональными различиями. Максимальные тренды среднегодовой и зимней температуры наблюдались вне области распространения ММП. В летний период на значительной части криолитозоны в Приуралье, в Западной Сибири, на Чукотке и в Приморье тренды были выше средних, достигая 0,9–1,1 °С за 100 лет.

Примечательно, что повышение температуры воздуха на территории России сопровождалось увеличением количества осадков, особенно в зимний период, и высоты снежного покрова. Сравнение данных за 1991–2005 гг. с нормой за 1961–1990 гг. показало увеличение высоты снега от 20–40 мм на севере Европейской территории России до 60 мм в Западной Сибири, в Приморье и на Камчатке. Несколько меньшее увеличение осадков – до 20 мм – происходило в Якутии и в Восточной Сибири, при этом продолжительность

залегания снежного периода повсеместно сокращалась. Поскольку снежный покров в зимнее время оказывает на грунты тепляющее воздействие, увеличение его высоты усилило влияние на их температуру, в том числе и в области распространения ММП. Имеющиеся данные свидетельствуют об увеличении среднегодовой температуры верхних горизонтов ММП с 1970-х гг. в большинстве точек наблюдения. Оно составило 1,2–2,8 °С на севере Европейской территории России, 1,0 °С – на севере Западной Сибири, 1,5 °С – в Центральной Якутии и около 1,3 °С – в Восточной Сибири [12].

Особый интерес представляют материалы по «аномальным» областям, где на фоне всеобщего климатического потепления продолжительное время преобладали обратные тенденции похолодания – северо-восток Канады [12]. Но и там с середины 1990-х годов температура верхнего горизонта мерзлых пород повысилась почти на 2 °С.

Казалось бы, широко развитое климатическое потепление, сопровождающееся ростом температуры верхних горизонтов грунтов, могло бы привести к синхронному увеличению глубины их сезонно-талого слоя. Однако в реальности наблюдения на специализированных площадках в различных районах криолитозоны отмечают это явление не везде. К числу причин этого можно отнести следующие [12]. Во-первых, это сложная связь мощности сезонно-талого слоя (СТС) с температурой воздуха, определяемая не только средними величинами, но и её годовым циклом. Во-вторых, эта связь зависит от конкретных ландшафтных условий, например, от орографии, растительности, геологии и т.д. Пространственная изменчивость этих внеклиматических факторов может оказывать большое влияние на параметры и свойства ММП, а при островном и прерывистом характере их распространения часто служит принципиальным условием их существования. Поэтому точечные измерения температуры грунта на глубинах до 3,2 м на метеостанциях, к тому же расположенных в нерепрезентативных условиях, не могут быть представительны в отношении мерзлых толщ. Это положение крайне важно для оценки наличия и свойств ММП, поскольку в модельных прогнозах геоэкологической обстановки основным фактором обычно является лишь изменение климата, а иные возможные критерии, как правило, игнорируются [12].

Изучая проблему влияния изменений климата на ММП, нужно учитывать, что наряду с общими для всей криолитозоны зональными закономерностями имеются и региональные особенности [25].

В начале XXI века постепенно начали формироваться иные, существенно отличающиеся от упомянутых представления о тенденциях и причинах динамики климата. Так, один из ведущих специалистов-климатологов В.Н. Клименко [5] привел такое, на наш взгляд, компромиссное мнение. Он считает, что в XX веке земной шар, по сравнению с концом XIX века, в среднем стал теплее на 0,7–0,8 °С. В.Н. Клименко полагал, что мнение о хозяйственной деятельности человека, как единственной причине потепления, хотя и имеет под собой очень серьезные основания, но излишне категорично и не учитывает мощные естественные факторы. В начале нашего века у большинства специалистов сформировались объективные и обоснованные, на взгляд автора, представления об истинном соотношении техногенных и естественных факторов, обуславливающих тенденции динамики современного климата Севера.

Одними из первых эти соображения поддержали мерзлотоведы Института криосферы Земли СО РАН (г. Тюмень) [6] и Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН (г. Якутск) [2,3]. Обзор этих материалов сделан недавно [15]. Позднее академик В.П. Мельников отметил [7,8], что серьезное и масштабное сотрудничество мерзлотоведов с климатологами началось лишь в последние тридцать лет, а до этого они работали

независимо друг от друга. В ближайшие десятилетия, по мнению мерзлотоведов, резких изменений климата на нашей планете не предвидится, а, скорее всего, будет некоторое похолодание, подобное тому, что наблюдалось в послевоенное время в XX веке.

Анализ тенденций изменения среднегодовой температуры грунта свидетельствует, что через некоторое время может и вовсе начаться эпоха похолодания. Во многих регионах уже фиксируется понижение среднегодовой температуры грунтов в слое годовых теплооборотов по сравнению с предыдущим десятилетием на значения от долей градуса до одного-двух градусов Цельсия [7,14]. Постепенно концепция о сочетании естественных и техногенных причин, обуславливающих тенденции изменения современного климата, была принята большинством ученых разных направлений.

В этом плане особый интерес представляет научное сообщение «Климат и Океан», сделанное 10 марта 2015 г. на заседании Президиума Российской академии наук академиком Р.И. Нигматулиным, директором Института Океанологии им. П.П. Ширшова РАН. В нем отмечено [11], что эффект глобального потепления до недавнего времени многими исследователями связывался в основном с ростом концентрации углекислого газа, происходящим вследствие антропогенной деятельности (действующих промышленных предприятий, выхлопных выбросов автотранспорта и т.д.). При этом в последние годы существенно сократились площади лесов, в значительной степени перерабатывающих углекислый газ.

Раскрыв этот сложный природный механизм формирования климата, ученый уверенно заявил, что существующий уровень развития науки позволяет значительно скорректировать имеющиеся представления. Академик Р.И. Нигматулин считает, что современные климатические модели пока несовершенны и их нельзя использовать для принятия глобальных решений.

На взгляд автора, основное внимание заслуживает мнение о том, что в криолитозоне современное потепление пока слабо повлияло на тепловое состояние мерзлых пород в отличие от техногенной составляющей, роль которой достаточно велика и многообразна, и, безусловно, заслуживает специального дальнейшего изучения.

Таким образом, наряду с климатическими флуктуациями, деструктивные процессы в ММП способны сами по себе вызвать техногенные воздействия. Это может привести к повреждению расположенных на них сооружений, при этом изменения климата будут играть второстепенную роль, а главенствующими станут разновидности техногенеза.

Техногенез

Среди многообразных видов воздействия на ММП, наряду с климатом, выделяется техногенез, чьи последствия частично освещены нами ранее [23,24]. В целом, техногенез на Севере оказывает на все природные среды, в т.ч. и на ММП влияние, сопоставимое с глобальными геологическими и географическими факторами, и существенно ухудшает эколого-геокриологическую ситуацию.

Как известно, при разноплановом и широкомасштабном освоении северных территорий обязательна оптимизация природопользования, заключающаяся в целенаправленном сочетании определенных видов хозяйственной деятельности, природоохранных и компенсационных мероприятий, обеспечивающих поддержание природной среды в близком к относительно стабильному экологическому состоянию. В результате всей отмеченной деятельности в осваиваемых районах Севера формируются своеобразные природно-техногенные комплексы (ПТК), под которыми предлагается понимать сочетание определенных техногенных систем одной или нескольких отраслевых принадлежностей,

функционирующих в конкретных природных условиях и отличающихся специфическими геоэкологическими последствиями своей деятельности. Многолетний опыт геоэкологических исследований позволяет отметить необходимость привлечения при исследовании преобразования окружающей среды в районах с различной спецификой воздействий: в зонах урбанизации, на территориях горнодобывающей деятельности комплексных методов и подходов, учитывающих как собственные свойства преобразуемой территории, так и специфику техногенной деятельности [21].

Основная роль в техногенном преобразовании геосистем Севера принадлежит горнодобывающей отрасли.

В настоящее время преобразование мерзлых толщ в процессе извлечения полезных ископаемых стало многообразнее и глубиннее, порой принципиально меняя общую тенденцию мерзлотного процесса. Так, при освоении железорудного месторождения Таежное в Южной Якутии по результатам исследований ИМЗ СО РАН площади развития мерзлых пород в интервале 1950–1980 гг. возросли на 15–20%, мощность на 20–40 м, а температура на глубине 12 м понизилась на 0,6 °С, отражая тем самым существенное увеличение суровости мерзлотных условий [20]. Подобные достаточно активные и масштабные изменения связаны с нарушениями, а порой и уничтожением напочвенных покровов, приводящим в местных климатических условиях к перераспределению снежного покрова и изменению условий теплообмена верхних горизонтов горных пород с приземными слоями атмосферы.

На золотоносных месторождениях Куранахской группы в Южной Якутии изменения имели обратную тенденцию – температура пород при отработке повысилась на 0,4–0,8 °С, что привело к сокращению площадей островов мерзлых пород, а в отдельных случаях и их полному оттаиванию [20]. Это произошло в результате изменения гидрологических и гидрогеологических условий при отработке объекта. Таким образом, направленность последствий отработки для ММП, может принципиально меняться в зависимости от природных условий месторождения.

Особое значение это направление приобрело в связи с реализацией таких масштабных проектов, как строительство и эксплуатация соответственно газового, названного «Сила Сибири», и нефтяного – «Восточная Сибирь – Тихий Океан» трубопроводов, разработки в Северо-Западной Якутии крупнейшего месторождения редкоземельных металлов Томтор и т.д. Создание всех этих объектов связано с разномасштабным воздействием на поверхностные геосистемы, в том числе и ММП, и сопровождается изменением характера их развития, морфологии, строения и свойств.

В специализированной отрасли знаний – инженерной геокриологии – обычно выделяют несколько тематических направлений хозяйственного освоения криолитозоны [18], зависящие от вида воздействия и масштаба его последствий.

Резкая активизация освоения территории как традиционными (горнодобывающая, селитебная), так и относительно новыми отраслями, связанными с железнодорожным и гидротехническим строительством, транспортировкой и переработкой углеводородов, вызвала на российском Севере необходимость постановки и решения ряда специальных задач.

Воздействие на верхние горизонты ММП осуществляется через сезонно-талый слой, глубина которого зависит как от состава и свойств пород, так и температур воздуха, и определяется не только их средними величинами, но и годовым циклом. Кроме того, глубина сезонного оттаивания грунтов зависит от меняющихся во времени ландшафтных условий, в частности от растительности [4,24], которая оказывает большое влияние на

параметры и состояние ММП, а в области их островного и прерывистого распространения часто является решающим фактором, обуславливающим само наличие или отсутствие. Возникновение и активизацию экзогенных геологических процессов также целесообразно рассматривать с позиций ландшафтного подхода, в основе которого лежит понятие об устойчивости ландшафтов к нарушениям [16,17]. Под ним обычно понимается способность геосистемы противостоять техногенной активизации криогенных процессов наряду с соответствующими изменениями самих природных комплексов, которые при неконтролируемом развитии могут привести к необратимому ухудшению экологической обстановки и недопустимым деформациям инженерных сооружений. Это направление уже много лет успешно развивается в ИМЗ СО РАН под руководством А.Н. Федорова. Не менее значительны последствия техногенеза в пределах урбанизированных территорий. Имеющаяся информация по проблеме свидетельствует, что в одном из крупнейших городов российского севера – Якутске – сформировался большой фонд жилых и общественных каменных зданий, составляющий около 3000, в том числе 968 жилых домов. Общее состояние многих строений специалистами признается катастрофическим. Так начиная с 1970 г. в городе произошло более 20 случаев крупных обрушений каменных зданий постройки 1950–1960 гг. [19], а в 1999 г. произошло обрушение угловой части здания на одной из центральных площадей города (рис. 3).



Рис. 3. Разрушение каменного здания в Якутске из-за нарушения несущих конструкций основания. Фото С.И. Серикова

Подобные аварии частей зданий происходили и в последующие годы, а их причиной в большинстве случаев являлось ослабление несущих конструкций (рис. 4). Однако делать вывод, что единственная причина этого заключается в глобальном потеплении, было бы неверным, хотя несомненно, что и оно могло сыграть определенную роль, усилив имевшие место деструктивные процессы. Анализ, проведенный органами городского управления с привлечением научных институтов, показал, что проблемы устойчивости инженерных сооружений на территории Якутска связаны, главным образом, с их неудовлетворительным проектированием, строительством и эксплуатацией, и лишь в малой степени обусловлены климатическим потеплением. Множество неклиматических факторов, среди которых можно указать на засоление и минерализацию грунтов из-за утечек сточных вод, отсутствие сети ливневой канализации, и, особенно, обводнение поверхности, сами по себе вызывают деградацию мерзлых оснований, фундаментов зданий и сооружений, а климатическое потепление лишь усиливает эти процессы [15]. Подчеркнем, что это положение справедливо не только для Якутска, но и для многих регионов Крайнего Севера России, где ошибочным было бы объяснять все наблюдаемые разрушения зданий и сооружений только лишь изменением климата. В каждом конкретном случае необходим тщательный анализ всех действующих факторов, поскольку в приведенной статистике значительную роль играет и неправильная конструкция сооружений, а также нарушение режима их эксплуатации.



Рис. 4. Деструкция свайного основания многоэтажного здания в Якутске. Фото С.И. Серикова

Очевидно, что сочетание упомянутых факторов неизбежно вызывает ухудшение инженерно-геологических условий, а тематические прогнозы указывают на то, что эти изменения могут усиливаться. В инженерной геокриологии разработаны эффективные методы стабилизации геотехнических объектов при деградации ММП [7,18]. В первую очередь к ним относятся термосифоны и вентиляционные устройства, позволяющие компенсировать последствия изменения климата и техногенеза. В то же время необходимо отметить, что использование стабилизирующих технологий весьма дорого, поэтому их повсеместное применение не всегда экономически целесообразно. Особое значение при этом приобретает прогноз последствий преобразования ММП как при естественном развитии, так и в результате техногенеза.

Основные методы мониторинга состояния ММП

Для оперативного контроля состояния криолитозоны необходима организация эколого-геокриологического и геотехнического мониторинга, который необходим на всех стадиях жизненного цикла объекта – проектирования, строительства и эксплуатации. Особое внимание при проведении мониторинга следует уделять следующим аспектам:

- изучению степени механических воздействий на поверхностные компоненты геосистем (микрорельеф, почвенно-растительный покров, поверхностные и грунтовые воды, сезонно- и многолетнемерзлые породы);
- изучению последствий механических воздействий и динамики мерзлотных условий (глубин сезонного оттаивания и промерзания грунтов, их температур, мощности мерзлой толщи и т.п.) и экзогенному рельефообразованию;
- контролю за состоянием объектов;
- разработке рекомендаций по уменьшению ущерба от освоения территорий и его компенсации.

Полностью избежать негативных последствий воздействия на ММП невозможно, но проведение геоэкологического мониторинга, состав и направления которого зависят как от специфики самого объекта, так и от природных условий района его размещения, дают возможность рекомендовать ряд природоохранных и компенсационных мероприятий, позволяющих существенно уменьшить ущерб от освоения.

Важной составляющей оперативного контроля масштабов и темпов реакции природной среды на освоение является использование современных геоинформационных компьютерных технологий, дистанционных съемок, позволяющих объективно оценить ущерб от вмешательства в естественное развитие геосистем [17,21].

В частности, для систематизации и наглядного отображения данных мониторинга эколого-геокриологических условий в связи с естественной и техногенной динамикой окружающей среды, успешно применяются ГИС-технологии. Данный подход позволяет практически в реальном времени интегрировать и наглядно представлять самую разнообразную, в т.ч. «многослойную» информацию о состоянии окружающей среды и её динамике на различных стадиях освоения.

При этом, наиболее удобной для последующего использования специалистами различных отраслей формой представления тематических материалов являются базы данных геоэкологической информации.

Использование материалов аэро- и космической съемки целесообразно для получения не только оперативной и объективной информации о состоянии природных и антропогенных объектов, но и для организации мониторинга изменчивости ландшафтов северных территорий. Так многие формы экзогенного рельефа очень наглядно отражаются на дистанционных снимках, а методы их дешифрирования детально изучены. Поэтому наиболее эффективным методом контроля их динамики является именно аэрокосмический мониторинг. Причем, поскольку применение одного только визуального дешифрирования является недостаточным для количественной оценки изменчивости природных и антропогенных объектов, оно успешно дополняется оптико-электронной обработкой и интерпретацией данных. Комплексирование всех методов позволяет получать более полную картину ситуации и проводить детальный анализ динамики геосистем и прогнозировать их последующую трансформацию. Комплексирование методов целесообразно осуществлять на базе ГИС, которая включает результаты проведенных измерений, анализа картографических материалов, космических и аэрофотоснимков и т.д. В последнее время широкое распространение получили разнообразные геофизические методы изучения состояния и свойств мерзлых пород, показавшие высокую эффективность при исследовании последствий воздействия на них [9,10]. Каждый из перечисленных методов и подходов изучения многолетнемерзлых пород имеет свои достоинства и недостатки, освещенные в специальных работах [9,10,13,17,18,21].

Экономические аспекты деформации ММП (вместо заключения)

Происходящие и прогнозируемые изменения ММП обычно сопровождаются разнообразными социально-экономическими последствиями. Современные представления по проблеме свидетельствуют, что преобразования мерзлых толщ горных пород представляют серьезную опасность для экономики северных регионов России, прежде всего из-за повышающегося риска повреждения их инфраструктуры.

Российские мерзлотоведы, в том числе и специалисты по инженерной геокриологии, за редким исключением, в последнее время не рассматривают климат в качестве ведущего фактора, способного единолично вызвать масштабные изменения криолитозоны, выходящие за пределы ее естественной изменчивости. При этом на сегодняшний день в РФ отсутствует нормативно-правовая база, которая могла бы стать основой методики оценки экономического ущерба, являющегося последствием воздействия на ММП при возведении новых и эксплуатации существующих сооружений.

Повышение температуры обычно не оказывает заметного эффекта на состояние массива горных пород до тех пор, пока оно не достигнет порогового уровня, лишь при превышении которого происходят качественные изменения мерзлых толщ, такие как их таяние, вызывающее массовые разрушения инфраструктуры различной ведомственной принадлежности.

Ряд методических принципов учета последствий нарушения естественных мерзлотных условий можно сформулировать, используя опыт немногочисленных зарубежных исследований [26] и учитывая климатические сценарии, прогнозы состояния ММП и геокриологических рисков. Прежде всего, данные наблюдений и результаты моделирования свидетельствуют, что с экономической точки зрения наиболее серьезной проблемой, связанной с таянием мерзлых толщ, является опасность разрушения расположенных на них объектов инфраструктуры. При этом иные аспекты, такие как геополитический (потеря прибрежной территории), социальный (влияние на традиционный жизненный уклад и виды деятельности коренных народов), природный

(изменения флоры и фауны), также важны, но их экономическая составляющая относительно невелика.

Для эффективного развития экономики северных регионов России особенно важен вопрос устойчивости инфраструктуры топливно-энергетического комплекса, которая включает в себя разветвленную сеть трубопроводов. Проведенные в США исследования показали, что для поддержания нормативной работоспособности существующей на Аляске инфраструктуры в период до 2030 г. потребуется от 3,6 до 6,1 млрд долларов, и около 7,6 млрд в период до 2080 г. [26]. Хотя подобные перспективные оценки для России отсутствуют, можно предположить, что с учетом значительно большего числа инфраструктурных объектов в криолитозоне, расходы на их поддержание будут более высокими. Уже сейчас только лишь на обслуживание трубопроводов в районах распространения ММП в России ежегодно расходуется около 55 миллиардов рублей [27]. Столь огромные расходы связаны с упущениями на стадии проектирования – такова цена недостаточного внимания к оценке особенностей геокриологических событий в прошлом. Знание специфики и масштабов этих событий безусловно сократит размеры расходов на сохранение устойчивости и безопасность объектов.

Список литературы

1. Анисимов О.А., Лавров С.Н. Глобальное потепление и таяние вечной мерзлоты: оценка рисков для производственных объектов ТЭК РФ. URL: <http://articles.excelion.ru/science/geografy/55448055.html>.
2. Балобаев В.Т., Шепелев В.В. Космопланетарные климатические циклы и их роль в развитии биосферы Земли // ДАН – 2001- – Т. 379, № 2. – С. 3-8.
3. Балобаев В.Т., Скачков Ю.Б., Шендер Н.И. Прогноз изменения климата и мощности мерзлых пород Центральной Якутии до 2200 года // География и природные ресурсы, Новосибирск: Изд-во ГЕО. – 2009. – № 2. – С. 50-56.
4. Браун Д., Граве Н.А. Нарушение поверхности и её защита при освоении Севера. – Новосибирск: Наука, 1981. – 88 с.
5. Клименко В.Н. Глобальные изменения климата: Что ждет Россию. URL: <http://www.polit.ru/analytics/2005/01/12/klim.html>.
6. Мельников В.П. К созданию цельного образа криосферы // Криосфера Земли, 2014, т. XVIII, № 4, с. 3–12.
7. Мельников В.П. В поисках цельного образа холодного мира: фундаментальные научные и философские начала // Арктика, Субарктика: мозаичность, контрастность, вариативность криосферы: Тр. междунар. конф. Тюмень, Эпоха, 2015, с. 1–5.
8. Мельников В.П., Геннадиев В.Б. Криософия – система представлений о холодном мире // Криосфера Земли. – 2011. Т. XV, № 4. с.3-8.
9. Нерадовский Л.Г. Научно-методические основы изучения мёрзлых грунтов слоя годовых теплооборотов методами электромагнитных зондирований: Дис. на соиск. уч. степ. д-ра техн. наук. Якутск: Ин-т мерзлотоведения СО РАН, 2016. 378 с.
10. Нерадовский Л.Г. Методика изучения методом дистанционно-индукционного зондирования динамики теплового состояния мерзлых грунтов в слое годовых теплооборотов криолитозоны Якутии // Разведка и охрана недр. – 2017. – № 4. – С. 14-24.
- 10П. Патент 2490671 RU, МПК G01V 3/12, G01S1 3/88. Способ георадиолокации многолетнемёрзлых пород / Л.Г. Нерадовский; заявитель Л.Г. Нерадовский. – №2011125238/28; заявл. 17.06.2011; опубл. 20.08.2013. Бюл. №23. – 11 с.

11. Нигматулин Р.И. Глобальное потепление и глобальное похолодание.// URL: <http://www.ras.ru/digest/showdnews.aspx?id=975854e9-8176-420e-8489-826scsee5084&print=1>. Дата обращения: 18 марта 2015.
12. Основные природные и социально-экономические последствия изменения климата в районах распространения многолетнемерзлых пород: прогноз на основе синтеза наблюдений и моделирования / Ред. Анисимов О. А. Авторский коллектив: Анисимов О. А., Белолуцкая М. А., Григорьев М. Н., Инстанес А., Кокорев В. А., Оберман Н. Г., Ренева С.А., Стрельченко Ю. Г., Стрелецкий Д.А., Шикломанов Н.И. М.: ОМННО Гринпис России, 2010. – 44 с.
13. Пармузин С.Ю. Рациональное природопользование в криолитозоне. Изд-во Московского университета. 2006. 146 с.
14. Скачков Ю.Б. Динамика изменения среднегодовой температуры воздуха в республике Саха (Якутия) за последние 50 лет. Труды Девятого международного симпозиума «Баланс углерода, воды и энергии и климат бореальных и арктических регионов с особым акцентом на Восточную Евразию», 1-4 ноября 2016 г., Якутск, Россия. Нагоя, Япония: Издательство Университета Нагоя. – 2016. – С. 208-211.
15. Стрелецкий, Д.А., Шикломанов, Н.И., Гребенец, В.И. Изменение несущей способности мерзлых грунтов в связи с потеплением климата на севере Западной Сибири // Криосфера Земли. - 2012. -Т. XVI. - № 1. - С. 22-32.
16. Федоров А.Н. Формирование криоэкологической напряженности в ландшафтах Центральной Якутии. Материалы Первой конференции геоэкологов России. – М., 1996. – Книга 2. – С.348-355.
17. Федоров А.Н., Торговкин Я.И. ГИС-технологии и вопросы современного мерзлотно-ландшафтного картографирования // Картографическое и геоинформационное обеспечение управления региональным развитием. Материалы VII научной конференции по тематической картографии. Иркутск, 20-22 ноября 2002 г. – Иркутск, 2002. – С. 238-241.
18. Хрусталева, Л.Н. Надежность северной инфраструктуры в условиях меняющегося климата : монография. - Москва : Университетская книга, 2011. - 260 с.
19. Шац М.М. Современное состояние городской инфраструктуры г. Якутска и пути повышения её надежности. // Геориск, М., 2011, №2, с.40-46.
20. Шац М.М., Дорофеев И.В. Геоэкологическое тематическое космофотокартирование Южно-Якутского ТПК // Дистанционные исследования Сибири. – Новосибирск, Наука, 1988, С. 78-88.
21. Шац М.М., Соловьев В.С. Дистанционный мониторинг геоэкологической обстановки Севера. Учебное пособие. Якутск, Изд-во Ин-та мерзлотоведения СО РАН, 2002, 63 с
22. Шац М.М., Скачков Ю.Б. Климат Севера: Потепление или похолодание? // Климат и природа. – 2016. – № 2(19). – С. 27-37.
23. Шац М.М., Скачков Ю.Б. ПОСЛЕДСТВИЯ ДИНАМИКИ СОВРЕМЕННОГО КЛИМАТА СЕВЕРА ДЛЯ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД. // Известия АО РГО. 2017. № 3 (46), С.38-53.
24. Шац М.М., Сериков С.И., Скачков Ю.Б. Роль техногенеза в современной динамике мерзлых толщ горных пород. //Климат и природа, 4 (25), 2017, С.3-16
25. Шерстюков А.Б. Изменения климата и их последствия в зоне многолетней мерзлоты России. – Обнинск: ГУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2009. – С. 127.
26. Larsen, P.H., Goldsmith, S., Smith, O., Wilson, M.L., Strzepek, K., Chinowsky, P., and Saylor, B. Estimating future costs for Alaska public infrastructure at risk from climate change / . - 2008 - No 18(3). - P. 442-457.

27. Streletskiy, D.A., Shiklomanov, N.I. and Hatleberg, E. Infrastructure and a Changing Climate in the Russian Arctic: A Geographic Impact Assessment / Proceedings of the 10th International Conference on Permafrost. - 2012. - Vol. 1. - P. 407-412.