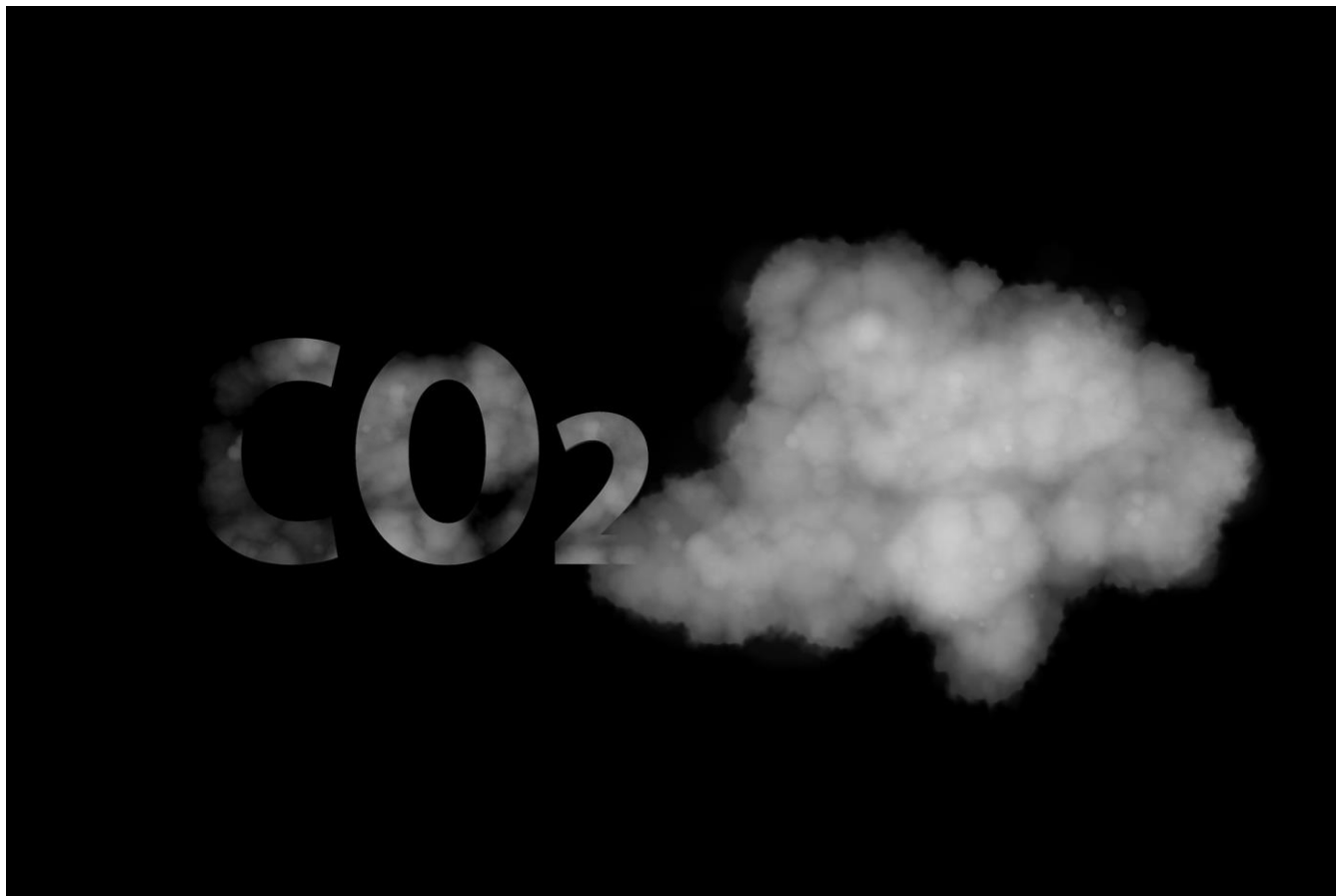


Последствия динамики современного климата севера для многолетнемерзлых толщ горных пород



В статье освещена временная динамика существующих представлений по основным тенденциям изменения климата и их последствиям для главных компонентов геосистем Севера Российской Федерации. Эти представления существенно отличались по тематической направленности, особенно на начальном этапе изучения проблемы. В конце прошлого и в самом начале настоящего веков существовало почти единодушное мнение об однозначном и повсеместном «глобальном» потеплении климата. Позднее, по мере расширения тематической комплексности подхода и соответствующего привлечения специалистов различных направлений, представления по проблеме значительно расширились и изменились.

Основной акцент предлагаемой статьи сделан на результатах изучения последствий изменения климата для одного из наиболее стабильных компонентов природной среды – многолетнемерзлых пород (ММП). В статье показано, что история климатического развития российского Севера представляет постоянное чередование периодов потепления и похолодания приземных слоев атмосферы, обусловленных разными причинами. Все эти периоды, в зависимости от активности и интенсивности источника теплового воздействия, имели различные степени последствий для мерзлых толщ горных пород. Отмечено, что наряду с

естественными, на многолетнемерзлые породы существенное, но менее масштабное воздействие оказывают техногенные факторы.

Шац Марк Михайлович

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

mmshatz@mail.ru

Скачков Юрий Борисович

Старший научный сотрудник Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН (ИМЗ), к.г.н.

ubskachkov@mpi.ysn.ru

Динамика современного климата и ее влияние на многолетнемерзлые породы (ММП) и состояние геотехнических объектов в криолитозоне является 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. Данная 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, станет одним из основных последствий климатических изменений в Арктике.

Ранее мы осветили два основных мнения о тенденциях и причинах изменения современного климата [15], 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.

Существовавшее в то время представление было высказано О.А. Анисимовым [1], по мнению которого «глобальное потепление» обусловлено «... главным образом парниковым эффектом образующихся при сжигании ископаемого топлива углекислого газа и метана, количество которого в атмосфере также увеличивается». О.А. Анисимов считал, что в продолжение происходящего потепления за несколько будущих

десятилетий температура воздуха может возрасти еще на 3 °С, что будет сопровождаться повышением температуры ММП и неизбежно приведет к утрате устойчивости многих геотехнических объектов.

Он отметил, что в случае сохранения современных тенденций изменения климата, а именно об этом свидетельствуют теоретические прогнозы, деградация ММП и обусловленные ей негативные геоэкологические последствия станут неизбежны и будут сопровождаться массовыми деформациями геотехнических объектов, выстроенных без учета тенденций динамики климата. Позднее мы ещё остановимся на этих событиях и их причинах. В обзорной работе [11] 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. В последние несколько десятилетий тренды значительно возросли и в 1970–2004 гг. средние по всей территории России значения составили: для средней годовой – 0,38 °С, для зимней – 0,51 °С и 0,32 °С для летней температуры воздуха за 10 лет.

Помимо сезонных, имеются ярко выраженные региональные различия. Так, в Приамурье тренд зимней температуры воздуха за последние 35 лет достигает 0,8 °С/10 лет. В то же время на севере Дальнего Востока произошло понижение зимней температуры до -0,4 °С/10 лет, при том что осенью и весной там же отмечается сильное повышение температуры до 0,6–0,8 °С/10 лет. Примечательно, что повышение температуры воздуха на территории России сопровождалось увеличением 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 покрова повсеместно сокращалась. Поскольку снежный покров оказывает на грунты тепляющее воздействие, увеличение его высоты усилило влияние на их температуру, в том числе и в области распространения ММП.

Приведенные данные свидетельствуют о повсеместном увеличении среднегодовой температуры верхних горизонтов ММП с 1970-х гг. 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.

Особый интерес представляют материалы по «аномальным» областям, где на фоне всеобщего климатического потепления продолжительное время преобладали обратные тенденции похолодания – северо-восток Канады [11]. И там с середины 1990-х годов температура верхнего горизонта мерзлых пород повысилась почти на 2 °С.

Широко развитое климатическое потепление, сопровождающееся ростом температуры верхних горизонтов грунтов, могло бы привести к синхронному увеличению глубины

сезонно-талого слоя. Однако в реальности наблюдения на специализированных площадках в различных районах криолитозоны отмечают это явление не везде. К числу причин этого явления можно отнести следующие.

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, она зависит от конкретных ландшафтных условий, например, от растительности, орографии, геологии и т.д. Пространственная изменчивость 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 геокриологической обстановки основным фактором обычно является лишь изменение климата, а иные возможные критерии, как правило, игнорируются [11]. Изучая проблему влияния изменений климата на ММП, нужно учитывать, что наряду с общими для всей криолитозоны закономерностями имеются и региональные особенности, одна из которых будет показана ниже.

Однако постепенно начали формироваться иные, существенно отличающиеся от упомянутых представления о тенденциях динамики климата. Так, один из ведущих специалистов-климатологов В.Н. Клименко [6] приводит такое, на наш взгляд, компромиссное мнение: «...несмотря на то, что земной шар сейчас намного теплее, чем в 30–40-х гг., Арктика все еще намного холоднее, чем в 30-х годах, а ледовитость морей сейчас более значительная.

Изменения, которые нас ожидают, на мой взгляд, далеки от катастрофы. Если понять, что происходит, понять то, что эти изменения неотвратимы, чтобы человек не делал: приняли Киотский протокол, не приняли, будем мы что-то ограничивать или нет. Климат меняется не только в результате антропогенного воздействия, но и в связи с космическими и геофизическими факторами: поведением Солнца, вулканов, океанической, атмосферной циркуляции, положением Юпитера, Сатурна и Луны по отношению к Земле».

В XX веке земной шар, по мнению В.Н. Клименко, по сравнению с концом XIX века в среднем стал теплее на 0,7–0,8 °С.

Фактические данные свидетельствуют, что потепление произошло в основном после 1970-го года, то есть всего за несколько десятков лет, хотя и в 30–40-х годах XX столетия тоже было потепление, которое особенно проявилось в Арктике, чем обусловило в 30-х годах её бурное освоение. 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. Ожидаемые изменения хотя и неотвратимы, но к катастрофическим последствиям привести не должны.

В начале нынешнего века у большинства специалистов сформировались объективные и обоснованные, на взгляд авторов, представления об истинном соотношении

техногенных и естественных факторов, обуславливающих тенденции динамики современного климата Севера.

Одними из первых эти соображения высказали мерзлотоведы Института криосферы Земли СО РАН (г. Тюмень) [7] и Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН (г. Якутск) [2]. Обзор этих материалов сделан недавно [15]. Позднее академик В.П. Мельников отметил [8], что серьезное и масштабное сотрудничество мерзлотоведов с климатологами началось лишь последние тридцать лет, а до этого они работали независимо друг от друга. Между тем, геологическая история Земли свидетельствует, что уже более двух миллиардов лет нашу планету сопровождает смена похолоданий и потеплений, причем отдельные похолодания сопровождались оледенениями такого масштаба, что приводили к гибели до девяноста процентов видов, существовавших когда-то на Земле. А эпохи потеплений приводили к возникновению множества новых видов. Таким образом фазы похолоданий и потеплений непосредственным образом обуславливали закономерности жизни на нашей планете. Поэтому в первую очередь следует обращать внимание на взаимосвязь криосферы со всеми природными явлениями на Земле. С этих позиций связь климата и криолитозоны становится очень актуальной темой.

В настоящее время общеизвестно, что лед является регулятором климата и в их взаимовлиянии заложена энергетика, способная вызывать крупные климатические изменения. При прохождении мощных теплых воздушных масс и их соприкосновении с массивами льда последние тают и происходит выделение холода. Противоположное явление происходит при замерзании воды – выделяется тепло. Эти противоположные процессы в значительной степени нивелируют климатические колебания.

Относительно прогноза состояния климата в обозримом будущем и его влияния на криосферу Земли, вся предыдущая история её развития свидетельствует, что никаких особых климатических катастроф ждать нет оснований. В ближайшие десятилетия резких изменений климата на нашей планете не предвидится, а скорее всего будет некоторое похолодание, подобное тому, что наблюдалось в послевоенное время.

В середине 70-х годов прошлого столетия оно вновь сменилось потеплением. Анализ тенденций изменения среднегодовой температуры грунта свидетельствует, что начинается эпоха похолодания. Во многих регионах фиксируется понижение среднегодовой температуры грунтов в зоне годовых теплооборотов по сравнению с предыдущим десятилетием на значения от долей градуса до 1–2 °С.

Постепенно представления о сочетании естественных и техногенных причин, обуславливающих тенденции изменения современного климата с частым преобладанием первых, 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 [10], что эффект глобального потепления до недавнего времени многими исследователями связывался в основном с ростом концентрации углекислого газа, происходящего 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.

Впрочем, этот интереснейший вопрос пока не является предметом нашей статьи. Гораздо важнее для нас мнение Р.И. Нигматулина о соотношении техногенных и естественных причин изменения климата. Ученый на примере течения Гольфстрим показал, что от его прогретых вод формируется теплый воздух, поступающий в Европу и принципиально меняющий её климат. Так, в полярной Исландии зимы стали такими же, как в южной Европе. В Москве также ощущается влияние теплого течения Гольфстрим, в ней гораздо теплее по сравнению с находящимися на одной широте Уфой и Тюменью, где зима холоднее, поскольку там Гольфстрим почти никакого влияния не оказывает. Даже в южных частях Норвегии, Швеции и Финляндии зима теплее, чем на Украине.

Особое внимание Р.И. Нигматулин уделяет особенностям формирования теплового баланса поверхности Земли, отмечая, что масса океана в триста раз превышает объем воздуха, а его теплоемкость, соответственно, выше в тысячу раз. В то же время в океане растворено углекислого газа в пятьдесят раз больше, чем в атмосфере, поэтому его роль в формировании климата, безусловно, решающая. Ученый отмечает ряд других механизмов, которые также влияют на формирование климата и приходит к выводу, что основные тенденции изменения климата за последние 150 лет сводятся к следующему: есть периоды потепления, чередующиеся с этапами стабилизации и похолодания. Именно он протекает в настоящее время, продолжается около 14 лет и продлится еще примерно 10 лет. Академик Р.И. Нигматулин считает, что современные климатические модели пока несовершенны и их нельзя использовать для принятия экономических решений.

Академиком Ю.А. Израэлем с соавторами [5] по данным о количестве осадков и высоте снежного покрова за период 1961–2003 гг. на северных метеорологических станциях РФ проведен комплексный анализ изменений температуры воздуха и грунтов. Оценен диапазон отклонений температур воздуха и почвы для разных периодов осреднения и их прогностических значений до 2020 года:

- от -0,9 до 3,4 °С для температуры воздуха;
- от -0,2 до 2,4 °С для температуры почвы на глубине 0,8 м;
- от -0,5 до 2,2 °С на глубине 1,6 м.

Расчитаны коэффициенты линейного тренда температуры воздуха, изменяющиеся в среднем за год в диапазоне от 0,013 до 0,058 °С/год, в среднем за холодный период от 0,014 до 0,072 °С/год и за теплый – от 0,012 до 0,044 °С/год. Коэффициенты линейного тренда температуры почвы на глубинах в среднем за год находятся в пределах от 0,004 до 0,059 °С/год, в холодный период – от -0,018 до 0,119 °С/год и от -0,035 до 0,071 °С/год в теплый период. Приведены примеры реконструкций температуры почвы на глубинах с помощью простой и множественной регрессий.

Ранее говорилось о роли региональных особенностей в формировании обзорной картины геокриологической обстановки отдельных регионов РФ. На примере побережий Арктических морей и островов Восточной Сибири в ряде работ показаны последствия климатического потепления в районах распространения ММП [4,11].

Среди существующих типов берегов наиболее подвержены деструктивным процессам

толщи, содержащие большие включения льда, называемые «ледовым комплексом» (рис.1). Судя по наблюдениям последнего десятилетия в центральной части моря Лаптевых скорости разрушения и отступления подобных берегов по сравнению со средней многолетней нормой увеличились в 1,5–2 раза.



Рис.1. Берега арктических морей на 90 % состоят из льда. Фото М.Н.Григорьева

Это явление внесло свой вклад в увеличение глубины сезонного оттаивания пород, слагающих прибрежные участки и сокращение морских льдов, в результате возросла штормовая активность, играющая главную роль в разрушении берегов. Ледяные морские берега, протяженность которых составляет более трети побережья Восточной Сибири, в настоящее время отступают со скоростью от 0,5 до 25 м/год, отражаясь на состоянии населенных пунктов, кладбищ, коммуникационных линий, средств навигационного обеспечения морского транспорта и других объектов.

Особую экологическую опасность в этой связи представляет утеря радиоизотопных термоэлектрических генераторов – источников питания маяков. Несмотря на то, что затрачиваются значительные усилия по обеспечению их нормативной эксплуатации, своевременной замене и надлежащей утилизации, имеются случаи их утери.

Немаловажен и геополитический аспект данной проблемы, когда только в Восточной Сибири Россия ежегодно теряет более 10 кв. км прибрежной суши, а по всему побережью Арктики – до 30 кв. км. Сокращается и площадь многих арктических островов, а некоторые малые острова, как, например, легендарная «Земля Санникова»,

исчезли, буквально «растворившись» в океане в течение прошлого столетия. На рисунке 2 отображены современные процессы деструкции берегов арктических морей.



Рис.2. Разрушение льдонасыщенных берегов арктических морей. Фото М.Н.Григорьева

Разрушаемые берега морей Восточной Сибири продуцируют большое количество берегового обломочного материала (в среднем 152 млн тонн/год) и органического углерода (4 млн тонн/год), поступающих в арктический бассейн и превышающих суммарный береговой вынос во все остальные арктические моря. По обломочному материалу вклад этих берегов составляет 55% от того, что дает все арктическое побережье России, по органическому углероду – 69%. Масса обломочного материала, поступающего от берегов морей Лаптевых и Восточно-Сибирского, почти в три раза превосходит региональный твердый сток рек. При этом «ледовый комплекс» побережий морей Восточной Сибири является важнейшим источником берегового потока наносов, его доля в общей массе наносов от берегов всех арктических морей составляет 42%, а по органическому веществу – 66%.

Наступление моря на сушу сопровождается активизацией негативных процессов даже на большом удалении от берега в сторону суши. Быстро развиваются овраги, провалы и оползни, разрушаются склоны. Эти процессы охватывают значительные площади, распространяются с высокой скоростью вглубь суши, сопутствуют разрушению и отступанию берегов и представляют большую опасность для объектов инфраструктуры [11]. До недавнего времени прогнозирование скорости разрушения арктических берегов было затруднено из-за ограниченности информации, но в настоящее время собран достаточный массив данных о многолетних трендах и скоростях отступления

берегов. Это позволяет предусмотреть возможные негативные последствия и разработать предупредительные и компенсирующие меры по уменьшению ущерба. Необходимо также отметить, что происходящее в Арктике потепление климата и обусловленное им сокращение площади льдов приведет к активизации штормов и ускорению разрушения и отступления берегов, а также к усилению выноса от берегов на шельф обломочного материала, в том числе к выбросам органического углерода, являющегося дополнительным источником парниковых газов – метана и углекислого газа.

Оригинальные материалы по этой тематике приводит сотрудник Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН С.О. Разумов [13]. Следствием потепления климатических условий в конце XX – начале XXI веков явилась резкая активизация деструктивных криогенных процессов на обширных территориях приморских низменностей и, особенно, на побережье восточного сектора Российской Арктики. В районах интенсивного освоения эти процессы развивались быстрыми темпами, достигая скорости разрушения льдистых берегов в 17 м/год.

Для оценки темпов разрушения льдистых берегов восточных арктических морей России, сложенных позднеплейстоценовым ледовым комплексом, в естественных условиях была применена физико-математическая модель динамики криогенных морских берегов в нестационарных климатических условиях. В этой модели основными факторами термоабразии арктических берегов являются климатические изменения и пространственная неоднородность мерзлотно-геологических условий. Высота береговых уступов на участках развития пород ледового комплекса колеблется от 10 до 30 м (*см.рис.1*).

В уступах обнажаются мощные повторно-жильные льды, прослеживающиеся от поверхности до подошвы, иногда включающие бивни мамонтов (*рис.3*). Минеральная компонента представлена тяжелыми и легкими пылеватыми супесями и суглинками, средняя объемная льдистость которых составляет 50%. Динамика криогенных комплексов побережья восточных арктических морей России в целом согласуется с изменением термических характеристик климата. Это положение подтверждается результатами наблюдений на мониторинговых участках арктического побережья, когда рост темпов разрушения криогенных берегов достигает 15–17 м/год.



Рис.3. Бивень мамонта в береге о-ва Бол. Ляховский. Фото М.Н.Григорьева

При повышении средней температуры воздуха сезона оттаивания на $3\text{ }^{\circ}\text{C}$, к середине XXI в. темп разрушений криогенных берегов может достигнуть катастрофических скоростей, при летних температурах воздуха $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ в 5–7 раз превышающих современные значения. При максимальных темпах природопользования скорость разрушения берегов может возрасти еще и достигнуть на отдельных участках льдистых берегов 40–50 м/год [12].

Сотрудники ИМЗ СО РАН В.Т. Балобаев, Ю.Б. Скачков и Н.И. Шендер [3] составили прогноз изменения климата и мощности мерзлых пород Центральной Якутии до 2200 года. С помощью метода гармонического анализа были изучены закономерности изменения во времени температуры воздуха в г. Якутске за период метеорологических наблюдений с 1829 г. Выявлены три гармонические функции, обобщенно описывающие этот температурный ряд.

До сих пор неясным остается вопрос, что лежит в основе этого мощного глобального энергетического процесса? Климат Земли за все время ее существования менялся постоянно. Но причины его изменений были разные. Большинство их носило периодический характер. Установлено, что начавшееся в 70-ые годы прошлого века потепление современного климата заканчивается и процесс переходит в режим похолодания, который продолжится до 2050–2060 гг., а далее температура будет колебаться с преобладанием дальнейшего похолодания. До настоящего времени антропогенные факторы не оказывали заметного влияния на температуру воздуха, а

завершающееся потепление – естественный природный процесс. Прогнозируется, что температура мерзлых пород будет колебаться, но их мощность останется практически неизменной.

Анализ данных по метеостанции г. Якутска свидетельствует, что средняя годовая температура воздуха за последние 50 лет увеличилась на 3,3 °С [14]. Это очень значительное потепление, но относить его к категории глобальных не следует. Для конкретных территорий температура воздуха определяется в значительной степени характером и интенсивностью переноса воздушных масс и их пространственной изменчивостью. В арктических регионах Якутии с иной системой атмосферной циркуляции, потепление, в отличие от Центральной Якутии, до последнего времени проходило более медленными темпами. А в таких городах, как Алдан, Олекминск, Ленск с конца 80-х годов прошлого столетия происходило даже слабое похолодание. Особое внимание в проводимых исследованиях уделяется изменению состояния ММП, возможности их оттаивания и увеличению слоя сезонного летнего протаивания. При этом потепления холодного и теплого периодов существенно отличаются – в Центральной Якутии зимнее потепление за 50 лет составило 4,5 °С, а летнее – менее 2 °С. В результате увеличение сезонного протаивания грунтов в годовом выражении почти не происходит.

В 1998 году Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН совместно с Геофизическим институтом Университета Аляски провел гармонический анализ длинных рядов наблюдений за температурой воздуха в г. Якутске и в г. Фербенксе. В результате было выявлено [3], что изменения температуры в г. Якутске хорошо описываются постоянной составляющей и четырьмя основными гармониками с периодами 300, 110, 75 и 14 лет. Анализ постоянной составляющей за период 1970–2000 гг., когда фиксировалось наибольшее потепление климата, не выявил ее роста в это время. Не было обнаружено и какой-либо линейной составляющей у кривой, соответствующей росту CO₂, что свидетельствует об отсутствии влияния «парникового» эффекта на температуру воздуха в районе Якутска, а её максимум возник вследствие совпадения фаз максимумов положительных амплитуд гармоник разного порядка.

Анализ показывает, что в период 2005–2017 гг. происходит завершение потепления, когда среднегодовая температура воздуха в Якутске достигнет -8,0 °С, после чего вплоть до 2054 г. предполагается интенсивное похолодание до -11 °С. Затем вероятен новый период потепления, который продлится до конца нашего века, когда температура может вновь подняться до -8,5 ÷ -9,0 °С. Следующее столетие будет характеризоваться относительным постоянством температуры воздуха, но к его концу она может понизиться до -11,5 °С и это станет самым низким, начиная с 1900 года, показателем.

Для составления прогноза изменения теплового состояния мерзлых пород в результате современного и последующего изменений климата, необходимо перейти от температуры воздуха к температуре поверхности мерзлых пород. Разница между ними очень большая и зависит от многих природных факторов, основные из которых: снежный покров, растительность, напочвенные покровы и свойства почвенно-грунтового слоя.

Количественно оценить их изменение в будущем пока невозможно. В.Т. Балобаев с соавторами сравнивали температуры воздуха и мерзлых горных пород на глубине 3,2 м по данным метеостанции Якутск за период 1963–2003 годы. Установленная зависимость использована мерзлотоведами ИМЗ для нахождения температуры поверхности мерзлых пород в предстоящее двухсотлетие.

Несмотря на колебания температуры дневной поверхности от нагревания к охлаждению и обратно, наблюдается неуклонное уменьшение мощности ММП. Колебания температуры влияют лишь на темп уменьшения данного параметра. Это объясняется тем, что в районе Якутска залегает мерзлая толща, имеющая нестационарный тепловой режим. Это нормальное явление, которое встречается в слабо сцементированных водонасыщенных породах верхней юры, мела и кайнозоя. Особенно широко оно развито на территории Западной Сибири и на низменностях Восточной Сибири.

Измерения в районе г. Якутска показали, что за период с 1991 по 2003 гг. температура до глубины 70 м в основном слабо менялась в сторону повышения. В.Т. Балобаев с соавторами особо подчеркивают, что криолитозона по своей физической сущности является чрезвычайно инерционной природной системой, различные колебания поверхностных условий вглубь которой распространяются медленно, неглубоко и быстро затухают. Опасаться следует только перехода температуры поверхности мерзлых пород в область положительных значений, что приводит к значительному увеличению слоя летнего оттаивания грунтов, либо к началу протаивания ММП сверху. Это приводит к кардинальной смене геосистем, потере устойчивости и надежности систем жизнеобеспечения и инженерной инфраструктуры, с их деформациями, а порой и полным разрушением. Прогнозы подобных событий на очень длительный срок мало достоверны, особенно учитывая значимость и непредсказуемость техногенного фактора [3].

Последствия техногенеза, особенно его «неразумного варианта», многообразны и отчетливы. На рисунке 4 наглядно представлено, к чему привело неконтролируемое движение буровой техники на гусеничном ходу с марта 2005 г. на участке трассы ж/д Томмот-Кердём. Немедленно возникшие термоэрозионные процессы, когда в некоторых местах глубина оврагов достигала двух метров, за два сезона привели дорогу в полную негодность. Аналогичные негативные последствия безграмотного освоения территорий, сложенных льдонасыщенными грунтами, повсеместны в криолитозоне.



Рис. 4. Термоэрозионные последствия бессистемного движения гусеничной техники на участке трассы ж/д Томмот-Кердём. 2006 г. (фото Л.Г. Нерадовского).

Заключение

Динамика современного климата и ее влияние на ММП и состояние инженерных объектов в криолитозоне является принципиальной проблемой, мнения по которой существенно отличаются. Проблема стала перед специалистами практически с момента становления геокриологии как науки и не потеряла актуальности до сих пор и имеет несколько аспектов, в том числе и изменение свойств и морфологии мерзлых толщ при различных сценариях изменения климата.

Вся история климатического развития нашей планеты представляет собой постоянное чередование периодов потепления и похолодания приземных слоев атмосферы, обусловленных разными причинами. Все эти периоды, в зависимости от активности и интенсивности источника теплового воздействия, имели различные продолжительность и амплитуду.

Обсуждаемое потепление климата обусловлено тремя разнопериодными источниками, максимумы которых совпали по фазе и наложились друг на друга. За последние полвека в Центральной Якутии потеплело на 2,0–3,3 °С [14]. В настоящее время потепление достигло своего максимума и вскоре вероятно сменится похолоданием [3]. Анализ изменения температуры воздуха за 200 лет не выявил какого-либо влияния парниковых газов. Возможно, их влияние не превышает доли градуса, а ведь именно

эти газы совсем недавно считались основной причиной потепления. В период потепления основной поставщик углекислого газа – океан. При его нагревании растворимость газа в воде уменьшается, и часть его возвращается в атмосферу. Антропогенный поток CO₂ составляет всего около 0,007% от его общего количества в атмосфере, поэтому заметно влиять на потепление он не может. В криолитозоне современное потепление пока слабо повлияло на тепловое состояние мерзлых пород и быть причиной катастрофических последствий не может. Что касается антропогенной составляющей, то её роль, к сожалению, достаточно велика и многообразна, и безусловно заслуживает специального изучения.

Список литературы

1. Анисимов О.А., Лавров С.Н. Глобальное потепление и таяние вечной мерзлоты: оценка рисков для производственных объектов ТЭК РФ. электронный ресурс: <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, – Т.379, №2. 2001, – 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. Григорьев М.Н., Куницкий В.В., Чжан Р.В., Шепелев В.В. Об изменении геокриологических, ландшафтных и гидрологических условий в арктической зоне Восточной Сибири в связи с потеплением климата // География и природные ресурсы, 2009. – № 2. – С. 5–11.
5. Израэль Ю.А., Павлов А.В., Анохин Ю.А. и др. Статистические оценки изменения элементов климата в районах вечной мерзлоты на территории Российской Федерации//Метеорология и гидрология. 2009, №5, с. 27-38.
6. Клименко В.Н. Глобальные изменения климата: Что ждет Россию. электронный ресурс: <http://www.polit.ru/analytics/2005/01/12/klim.html>.
7. Мельников В.П. Прогресс на вечной мерзлоте. Электронный ресурс: <http://www.expert.ru/printissues/ural/2005/17/17ur-unit/>.
8. Мельников В.П. Европу замело // Электронный ресурс: Источник: Русский собеседник. Код доступа:<http://rusoch.fr/guests/evropu-zamelo.html#more-7975>. Дата обращения: 7 февраля 2012.
9. Нерадовский Л.Г. Изучение ледового комплекса Лено-Амгинского междуречья // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. – 2008, № 5. – С. 460-467.
10. Нигматулин Р.И. Глобальное потепление и глобальное похолодание // Электронный ресурс: Источник [ras.ru](http://www.ras.ru). Код доступа: <http://www.ras.ru/digest/showdnews.aspx?id=975854e9-8176-420e-8489-826cseee5084&print=1>. Дата обращения: 18 марта 2015.
11. Основные природные и социально-экономические последствия изменения климата в районах распространения многолетнемерзлых пород: прогноз на основе синтеза наблюдений и моделирования. Редактор: 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.

12. Разумов С.О. Оценка современных темпов деградации многолетнемерзлых пород, тенденций и последствий ее развития в XXI в. // Приоритеты мировой науки: эксперимент и научная дискуссия: Материалы VIII международной научной конференции 17-18 июня 2015 г. Часть 1. Естественные и технические науки. – North Charleston, SC, USA: CreateSpace, 2015. – С. 39–43.

13. Разумов С.О. Катастрофическое разрушение береговых криогенных геосистем восточной Арктики в современных и прогнозируемых природно-техногенных условиях // Материалы IX международной конференции «Анализ, прогноз и управление природными рисками в современном мире ГЕОРИСК -2015», Москва, 12-14 октября. – М.: РУДН, 2015. – Т. 2. – С. 517-523.

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", посвященного 25-летию начала совместных Российско-Японских исследований по изучению изменения климата в криолитозоне, 1-4 ноября 2016 г., Якутск, Россия. Нагоя, Япония: Издательство Университета Нагоя. – 2016. с. 208-211.

15. Шац М.М., Скачков Ю.Б. Климат Севера: Потепление или похолодание? // Климат и природа. 2016, №2 (19), с.27-37.