**Глобальное потепление и таяние вечной мерзлоты: оценка рисков для производственных объектов ТЭК РФ**

Олег Анисимов, д.г.н., Государственный гидрологический институт, Сергей Лавров, д.т.н., ЗАО «ЭКОПРОЕКТ», Санкт-Петербург

Из-за продолжающегося глобального потепления эффект «ухода Земли из под ног» может стать реальностью во многих районах распространения вечной мерзлоты. Рост температуры мерзлых грунтов и уменьшение их несущей способности представляют серьезную опасность для ТЭК России, приводя к повреждениям объекты инфраструктуры и затрудняя освоение новых месторождений. Можно ли заглянуть в будущее и дать прогноз состояния вечной мерзлоты для основных районов нефте- и газодобычи? Какова точность таких прогнозов? Ответы на эти вопросы дают исследования изменения климата и его последствий, проводимые в Государственном гидрологическом институте в Санкт-Петербурге.

Мировая экономика и экологическая безопасность продолжают оставаться зависимыми от климата. Это подтверждают многие факты, имевшие место в начале XXI века. Среди них необычные наводнения, в результате которых в мае 2001 года город Ленск был почти полностью уничтожен; частичное затопление летом 2002 года несколько крупных европейских городов; небывалые ранее как по величине, так и по продолжительности положительные аномалии температуры воздуха, зафиксированные летом 2003 года в Западной Европе. Современные изменения климата способствовали усилению многих природных опасностей, в том числе и геокриологических, связанных с таянием льда. Сопутствующие им геоморфологические процессы оказывают неблагоприятное воздействие на окружающую среду и объекты инженерной инфраструктуры в районах Крайнего Севера.

В районах распространения вечной мерзлоты на территории РФ сосредоточено более 80% разведанных запасов нефти, около 70% - природного газа, огромные залежи каменного угля и торфа, создана разветвленная инфраструктура объектов ТЭК. Для расположенных в этих районах сооружений (дорог, нефте- и газопроводов, резервуаров, площадок нефтегазопромысловых объектов, зданий и др.) наибольшую опасность представляет таяние вечной мерзлоты. Многие из них построены на свайных фундаментах, используют многолетнемерзлый грунт в качестве оснований и рассчитаны на эксплуатацию в определенных температурных условиях. Исследования показали, что при оттаивании мерзлых грунтов изменяются их физико-механические свойства (объемный вес, влажность, пористость, адгезия к сваям-основаниям), что в конечном счете уменьшает несущую способность фундаментов, приводя к повреждению построенных на них сооружений.

Не менее серьезную угрозу представляет оттаивание льдонасыщенных грунтов и пластов погребенного льда, мощность которых может достигать нескольких метров (см. фото 1). Таяние содержащегося в грунте льда сопровождается просадками земной поверхности и развитием опасных мерзлотных процессов: термокарста, термоэрозии и др. В результате происходят значительные изменения рельефа, которые ухудшают напряженно-деформированное состояние трубопроводов и других сооружений, расположенных в данной местности.

В России общая площадь районов распространения вечной мерзлоты равна ~10,7 млн. км2, что составляет около 63% территории страны (см. рис. 1). В зависимости от сомкнутости многолетнемерзлых пород, различают области их сплошного (более 90% площади), прерывистого (50%-90%) и островного (10%-50%) распространения, между которыми можно провести условные границы. На протяжении двадцатого столетия наблюдался рост температуры верхних слоев многолетнемерзлых грунтов и увеличение глубины сезонного протаивания, причем в последние три десятилетия эти процессы ускорились. С начала 1970-х годов температура мерзлых грунтов повысилась на 1-1,5°C в центральной Якутии и до 1,0°C в Западной Сибири, при том, что температура воздуха увеличилась на 1,0-2,5°C. Эти изменения, несомненно, обусловлены глобальными процессами, поскольку на севере Аляски также происходило потепление, причем намного более сильное. С начала XX столетия до 1980-х годов температура верхнего горизонта мерзлых пород увеличилась на 2 - 4°C , а в последующие 20 лет до 2002 года еще в среднем на 3°C. На северо-западе Канады верхний слой вечной мерзлоты за последние два десятилетия стал теплее на 2°C. В особенности большой интерес представляют данные «аномальных» областей, где на фоне глобального климатического потепления продолжительное время преобладали тенденции похолодания. К таковым относится северо-восток Канады. Примечательно, что с середины 1990-х годов и в этой области температура верхнего слоя мерзлых пород увеличилась почти на 2°C, что подтверждает точку зрения, согласно которой происходящие изменения обусловлены глобальным потеплением.

Если современные тенденции сохранятся, а именно на это указывают теоретические прогнозы климата, опасные геоэкологические последствия деградации вечной мерзлоты будут неизбежны. В результате возможны массовые деформации зданий и сооружений, построенных без учета климатического потепления. Многие факты свидетельствуют о том, что в последние десятилетия деструктивное воздействие криогенных процессов на объекты инфраструктуры в области распространения вечной мерзлоты усилилось . Согласно опубликованным данным, в Западной Сибири ежегодно происходит около 35 тыс. отказов и аварий на нефте- и газопроводах. Причем около 21% всех зафиксированных аварий вызваны механическими воздействиями, в том числе связанными с потерей устойчивости фундаментов и деформацией опор . Полевые геоэкологические обследования объектов нефтегазового комплекса в Ямало-Ненецком АО, в Ненецком АО и других районах распространения вечной мерзлоты указывают на то, что вокруг добывающих и разведочных скважин часто возникают зоны растепления. Это приводит к просадке грунтов и образованию в приустьевой зоне воронок, влияющих на устойчивость скважины и ее наземного оборудования.

Помимо объектов ТЭК имеются многочисленные примеры нарушения целостности и разрушения жилых и производственных зданий из-за уменьшения несущей способности вечной мерзлоты и различных форм термокарста. В Якутске с начала 1970-х годов более 300 зданий получили серьезные повреждения в результате просадок мерзлого грунта. Статистика свидетельствует, что в период с 1990 по 1999 годы число зданий, получивших различного рода повреждения из-за неравномерных просадок фундаментов, увеличилось по сравнению с предшествующим десятилетием на 42% в Норильске, на 61% в Якутске и на 90% в Амдерме (НАО). Проблема устойчивости сооружений осложняется негативным влиянием антропогенных и техногенных факторов, усиливающих деструктивное воздействие меняющегося климата. Иллюстрацией такого рода опасностей может служить фото 2, сделанное в июне 2001 года в пос. Черский, расположенном в верхнем течение р. Колымы. Повышение температуры воздуха, произошедшее в конце 1990-х годов, в сочетании с постоянными небольшими утечками воды из систем водо- и теплоснабжения привели к развитию термокарстовых процессов под фундаментом здания, в результате которых одна из его секций обрушилась.

Возможность прогноза состояния вечной мерзлоты и построенных на ней объектов зависит от того, с какой точностью современная наука может предсказать будущие изменения климата. Несмотря на значительные успехи, достигнутые в таких исследованиях, многое еще остается неясным.

**Можно ли предсказать будущие изменения климата?**

В XX столетии средняя годовая температура воздуха в среднем по Земле увеличилась приблизительно на 0,6°C, при этом области распространения вечной мерзлоты потеплели значительно больше, местами до 5°C. Такие изменения температуры не имели места на протяжении по крайней мере 1000 предыдущих лет. Для Земли в целом период с 1991 по 2000 г. был самым теплым десятилетием, а 1998 и 2001 – самыми теплыми годами за всю историю инструментальных измерений температуры воздуха. Является ли это проявлением глобального потепления, вызванного воздействием человека на климат?

До сих пор существуют различные мнения по этому вопросу. Хотя некоторые скептики и отрицают саму идею глобального потепления, большинство ученых поддерживают иную точку зрения, согласно которой оно объективно существует и объясняется действием антропогенных и естественных факторов, главным образом парниковым эффектом углекислого газа, поступающего в атмосферу при сжигании ископаемого топлива, и метана, содержание которого в атмосфере также растет. Для построения прогнозов будущего климата важным является вопрос о том, как изменится средняя по Земле температура в случае удвоения современной концентрации углекислого газа в атмосфере. Эта величина, получившая название чувствительность климата, по различным теоретическим оценкам находится в пределах от 1,5 – 5,8°C. Ее также можно оценить, сопоставляя температуру воздуха и содержание углекислого газа в атмосфере в прошлые геологические эпохи. Согласно таким данным, чувствительность климата близка к 3°C, и, следовательно, именно настолько может вырасти средняя по всей Земле температура воздуха через 50-70 лет, даже если в результате предпринимаемых многими странами мер скорость поступления парниковых газов в атмосферу будет постепенно уменьшаться. В контексте рассматриваемой проблемы влияния потепления на устойчивость инфраструктуры ТЭК важно знать, как при этом будет изменяться температура в области распространения вечной мерзлоты в ближайшие несколько десятилетий.

Данные, полученные в результате расчетов по трехмерным климатическим моделям, указывают на то, что в ближайшие 25-30 лет среднегодовая температура на арктическом побережье Сибири может увеличиться на 3-5°C, в Якутии, на Дальнем Востоке и на севере европейской территории России – на 2-4°C. На северо-западе России и на севере Европы потепление будет слабым, не более 1°C, что отчасти обусловлено стабилизирующим влиянием океанических течений. К середине столетия эти цифры могут возрасти в полтора-два раза. Результаты расчетов по моделям различаются между собой, и для каждого района можно выделить диапазон между минимальной и максимальной оценками, который характеризует точность прогноза температуры в данном регионе. Среди множества существующих теоретических моделей климата можно отобрать пять, разработанных в ведущих научных центрах Германии (ECHAM-4), Англии (HadCM-3), США (GFDL, NCAR) и Канады (CCC), которые лучше других описывают известные закономерности изменения климата в области распространения вечной мерзлоты. Несмотря на предпринимаемые усилия по увеличению точности каждой из моделей, отклонения прогнозов по отдельным моделям от средней оценки изменения температуры воздуха все же достаточно велики и иногда превышают 50%.

**Как будет меняться вечная мерзлота?**

Воздействие изменения климата на вечную мерзлоту будет проявляться прежде всего в изменении температуры многолетнемерзлых пород и увеличении глубины сезонного протаивания. Со временем эти процессы приведут к сокращению площади вечной мерзлоты, часть которой либо протает полностью, либо перейдет в реликтовую форму и будет отделена от поверхности талым слоем. Особенно высокой уязвимостью обладают мерзлые грунты с повышенным содержанием солей. В таких грунтах по всей глубине мерзлого слоя наблюдаются линзы различного размера с высокоминерализированной водой, имеющей отрицательную температуру – криопэги. Рассол в криопэгах находится в термодинамическом равновесии с окружающим мерзлым грунтом, и даже небольшое увеличение температуры грунтов, при том, что она остается отрицательной, приводит к нарушению равновесия раствор-лед и развитию деструктивных геоморфологических процессов. Особую опасность криопэги представляют для опор и скважин. Локальное протаивание прилегающего к криопэгу грунта вблизи вертикальной стенки даже на большой глубине может привести к распространению рассола вдоль всей конструкции и дальнейшему протаиванию грунта вдоль скважины или опоры. Засоленные грунты широко распространены на Ямале в районах открытых и перспективных нефте- и газовых месторождений. Проблема взаимодействия сооружений с криопэгами также возникла при проектировании и строительстве железной дороги Обская – Бованенково.

Для получения количественных оценок изменения параметров вечной мерзлоты можно использовать математические модели.

Расчеты, проведенные с использованием пяти различных долгосрочных прогнозов изменения климата, дали следующие результаты. В ближайшие 25-30 лет площадь вечной мерзлоты может сократиться на 10%-18%, а к середине столетия на 15%-30%, при этом ее граница сместится к северо-востоку на 150-200 километров. Повсеместно увеличится глубина сезонного протаивания, в среднем на 15%-25%, а на Арктическом побережье и в отдельных районах Западной Сибири до 50%. В Западной Сибири (Ямал, Гыдан) температура мерзлых грунтов повысится в среднем на 1,5-2°C, с -6...-5°C до -4...-3°C, и возникнет опасность формирования высокотемпературных мерзлых грунтов даже в районах Арктики . На участках деградации вечной мерзлоты в южной периферийной зоне будет происходить таяние островов мерзлоты. Поскольку здесь мерзлые толщи обладают небольшой мощностью (от нескольких метров до нескольких десятков метров), за время порядка нескольких десятилетий возможно полное протаивание большинства островов мерзлоты. В наиболее холодной северной зоне, где вечная мерзлота подстилает более 90% поверхности, будет главным образом увеличиваться глубина сезонного протаивания. Здесь также могут возникать и развиваться крупные острова несквозного протаивания, в основном под водными объектами, с отрывом кровли мерзлоты от поверхности и сохранением ее в более глубоких слоях. Промежуточная зона будет характеризоваться прерывистым распространением мерзлых пород, сомкнутость которых будет уменьшаться в процессе потепления, а глубина сезонного протаивания расти.

Таяние приповерхностной вечной мерзлоты будет сопровождаться значительными изменениями ландшафта с преобладанием депрессивных форм, приводя к формированию термокарстовых озер. Очевидно, что изменения, связанные с таянием приповерхностной мерзлоты, крайне опасны для любых имеющихся сооружений в этой зоне. Менее очевидно, насколько опасны последствия потепления там, где вечная мерзлота сохранится, при том, что увеличится глубина ее сезонного протаивания.

Полный текст статьи будет опубликован в ближайших номерах журнала «Технологии ТЭК»

**Список литературы**

1. Анисимов О.А., Нельсон Ф.Э. и Павлов А.В. Прогнозные сценарии эволюции криолитозоны при глобальных изменениях климата в XXI веке.- Криосфера Земли, 1999, № 4, с. 15-25.

2. Павлов А.В. Мерзлотно-климатический мониторинг России: методология, результаты наблюдений, прогноз.- Криосфера Земли, 1997, № 1, с. 47-58.

3. Lachenbruch, A.H. and B.V. Marshall. Changing climate: geothermal evidence from permafrost in the Alaskan arctic.- Science, 1986, № p. 689-696.

4. Osterkamp, T.E. and V.E. Romanovsky. Evidence for warming and thawing of discontinuous permafrost in Alaska.- Permafrost and Periglacial Processes, 1999, № 10, p. 17-37.

5. Nelson, F.E. (Un)frozen in time...- Science, 2003, № 299, p. 1673-1675.

6. Majorowicz, J.A. and W.R. Skinner. Anomalous ground warming versus surface air warming in the Canadian Prairie provinces.- Climatic Change, 1997, № 4, p. 485-500.

7. Анисимов О.А. и Белолуцкая М.А. Оценка влияния изменения климата и деградации вечной мерзлоты на инфраструктуру в северных регионах России.- Метеорология и гидрология, 2002, № 6, с. 15-22.

8. Nelson, F.E., O.A. Anisimov, and N.I. Shiklomanov. Subsidence risk from thawing permafrost.- Nature, 2001, № 410, p. 889-890.

9. Nelson, F.E., O.A. Anisimov, and N.I. Shiklomanov. Climate change and hazard zonation in the circum-Arctic permafrost regions.- Natural Hazards, 2002, № 3, p. 203-225.

10. Вартанова О.В. Методические подходы к оценке надежности и экологической безопасности промысловых трубопроводов.- Нефтяное хозяйство., 1998, № 11, с. 47-48.

11. Николаев Н.Н. Основные причины возникновения аварийных отказов на магистральных трубопроводах.- Нефть и газ. Известия ВУЗов, Тюменский государственный университет., 1999, № 2, с. 77-81.

12. Weller, G. and M. Lange, eds. Impacts of global climate change in the arctic regions. Report from a Workshop on the Impacts of Global Change. . 1999, Published by Center for Global Change and Arctic System Research, University of Alaska, Fairbanks.: Tromse, Norway. 59 p.

13. Houghton, J.T., Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. Van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C.A. Johnson, eds. Climate change 2001: the scientific basis. Contribution of working group I to the Third assessment report of the intergovernmental panel on climate change. . 2001, Cambridge University Press: Cambridge. 881 p.

14. Борзенкова И.И. Определение чувствительности глобального климата к газовому составу атмосферы по палеоклиматическим данным.- Физика атмосферы и океана, 2003, № 2, с. 222-231.