**Вечная мерзлота и современный климат**

А.В.Павлов, Г.Ф.Гравис

На исходе XX века проблема изменений климата в сторону глобального потепления стала одной из центральных, волнующих мировую общественность. Повышение температуры воздуха большая часть ученых-климатологов связывает со все возрастающими промышленными выбросами в атмосферу двуокиси углерода, метана, и других газов, вызывающих парниковый эффект. Еще недавно, всего несколько лет назад, ряд крупных климатологов прогнозировал повышение температуры воздуха на Севере в начале XXI века на 10-15 градусов Цельсия. Ученый-уфолог А.К.Прийма даже предсказывал, что при таком резком потеплении климата треть человечества может погибнуть от засух и катастроф.

Анализ метеорологических данных по ряду стран Северного полушария (Россия, Канада, США-Аляска, Китай) подтверждает, что в последние 25-30 лет действительно происходит потепление климата, хотя и более умеренное. Повышение температуры воздуха за этот период в большинстве регионов России составляет 1-1,2 градуса Цельсия. По данным Американского геофизического союза, за 1991-1997 годы глобальная температура воздуха повысилась на 0,62 градуса Цельсия. В последние 3-4 года потепление климата мог почувствовать каждый россиянин средней полосы нашей страны: здесь жаркие и сухие летние сезоны и мягкие зимы следовали друг за другом. Нашим современникам особенно запомнится лето 1999 года, сценарий которого развивался по М.Е.Салтыкову-Щедрину, точно как в городе Глупове во время правления градоначальника Фердыщенки, когда "с самого вешнего Николы, с той поры, как начала входить вода в межень, и вплоть до Ильина дня не выпало ни капли дождя... небо раскалилось... пахло гарью... травы и всходы огородных овощей поблекли..."

Люди задались вопросом - почему это происходит и что будет дальше? Глуповцы видели причину возникшего несчастья в распутстве Фердыщенковой любовницы Аленки. К сожалению, в наши дни высокообразованные специалисты, владеющие арсеналом современных математических методов и быстродействующей компьютерной техникой, также пока не могут уверенно объяснить, что случилось с климатом Земли, будет ли он намного теплее в XXI веке по сравнению с XX, в чем причины глобальных климатических изменений? В наши дни заговорили о смещении полюсов и даже о натовских бомбардировках Югославии, мол, виноваты они. Потепление климата приводит, в свою очередь, к оттаиванию вечной мерзлоты и освобождению газов (особенно метана), захороненных в мерзлоте, и их дополнительному поступлению в атмосферу. Не случайно в газетных сообщениях последних лет появились предостерегающие заголовки: "Метановая бомба в вечной мерзлоте". Что это - реалии или фантазии? Многочисленные исследования по проблеме глобального потепления климата проводились и проводятся в рамках тематических планов институтов, государственных и международных программ.

Россиян проблема ожидаемых изменений климата интересует или должна интересовать особо: как никак более 65% ее огромной территории занято вечной мерзлотой, которая зависит от климата, чутко реагирует на малейшие его изменения и поэтому отнюдь не является вечной.

Скованные льдом горные породы развиты на севере Европейской России, Урала, севере Западной Сибири (примерно до широтного отрезка Оби), на большей части Восточной Сибири, Забайкалья и Дальнего Востока. Отрицательные температуры проникают в земную кору до глубины 1300-1500 м, минимальные их среднегодовые значения достигают -15...-16 градусов Цельсия. Вечномерзлый покров литосферы в плане напоминает изрядно потертое одеяло: вдоль верхнего (северного) края карты России он почти сплошной, с редкими дырами и прорезями в виде таликов под крупными озерами и реками, мощность мерзлоты здесь максимальна, а температуры минимальны. К югу таликовых прорех становится все больше, толща мерзлоты уменьшается, температура ее повышается и у нижнего, южного края области вечной мерзлоты от сплошного покрова остаются одни лоскутки - острова мерзлых пород мощностью в несколько метров или десятков метров с температурой, близкой к нулю.

Хозяйственное значение области вечной мерзлоты, или криолитозоны, как ее называют мерзлотоведы, трудно переоценить. Это - стратегический тыл экономики России, ее топливно-энергетическая база и валютный цех. Северный край страны населен крайне скудно. На огромных просторах арктических холодных пустынь, тундры, лесотундры, тайги и горных степей, на равнинах, плоскогорьях и в горах на один квадратный километр приходится менее одного человека. В Ямало-Ненецком национальном округе этот показатель равен 0,6 чел. на кв. км, в Корякии и на Чукотке - 0,1-0,2, а в Эвенкии и на Таймыре и вовсе 0, 03-0,06

Тем не менее нельзя забывать, что в пределах криолитозоны России сосредоточено более 30% разведанных запасов всей нефти страны, около 60% природного газа, неисчислимые залежи каменного угля и торфа, большая часть гидроэнергоресурсов, запасов цветных металлов, золота и алмазов, огромные запасы древесины и пресной воды. Значительная часть этих природных богатств уже вовлечена в хозяйственный оборот. Создана дорогостоящая и уязвимая инфраструктура: нефтегазопромысловые объекты, магистральные нефте- и газопроводы протяженностью в тысячи километров, шахты и карьеры, гидроэлектростанции, возведены города и поселки, построены автомобильные и железные дороги, аэродромы и порты. На вечной мерзлоте стоят Магадан, Анадырь, Якутск, Мирный, Норильск, Игарка, Надым, Воркута, даже в границах Читы имеются острова вечной мерзлоты. В настоящее время хорошо разработаны методы прогнозирования последствий строительства зданий и сооружений на вечной мерзлоте. Однако не только деятельность человека меняет мерзлотные условия. В гораздо больших масштабах оказывают влияние на мерзлые толщи труднопредсказуемые изменения климата.

Прогрессивное оттаивание мерзлых пород может обернуться катастрофическими последствиями. Дело в том, что верхние горизонты вечномерзлых пород мощностью от 2-5 до 30-50 м и более содержат лед в виде мелких линзочек и жилок, а также крупных залежей в виде клиновидной решетки (полигональной в плане) или пластовых залежей мощностью до 30-40 м. На некоторых участках северных равнин лед составляет до 90% объема мерзлых пород (рис. 1). Б.И.Втюрин оценивает запасы подземных льдов криолитозоны России в 19 тыс. куб. км, что дает право иногда называть вечную мерзлоту подземным оледенением.

Рис.1.Крупные ледяные жилы в вечномерзлых породах.Хребет Кулар, Северная Якутия

Оттаивание льдонасыщенных пород будет сопровождаться просадками земной поверхности и развитием опасных мерзлотных (криогенных) геологических процессов: термокарста, термоэрозии, солифлюкции и др. Целые регионы с низкими абсолютными отметками поверхности окажутся затопленными морем. Возникнет угроза разрушения зданий и инженерных сооружений, возведенных с сохранением мерзлого основания. Такие последствия потепления климата станут разорительными для экономики.

Мерзлотоведы в состоянии количественно оценить грядущие изменения вечной мерзлоты на любой срок времени и предотвратить многие вредные их последствия, свести к минимуму затраты на стабилизацию мерзлотной обстановки, но только в том случае, если достоверно известны исходные климатические параметры. Загвоздка в том, что климатические прогнозы еще далеки от совершенства, что объясняется сложной природой изменений погоды и климата. Климат постоянно претерпевает естественные изменения. В 1625 г. сэр Фрэнсис Бэкон обратил внимание на то, что кроме суточных и сезонных изменений метеорологических элементов имеются еще многочисленные многолетние циклы их изменения. В 1957 г. Дж.К.Чарлсуэрт уже насчитывал около 150 циклов колебаний климата различной продолжительности. А.С.Монин и Ю.А.Шишков выделяют миллиардолетние циклы, циклы продолжительностью в сотни и десятки миллионов лет и более мелкие (в историко-геологическом понимании) колебания с периодом от десятков тысяч до десятков лет. Хорошо известны короткопериодные колебания метеорологических элементов: 9-14-летние, 5-6-летние и др. Все разнопериодные циклы изменения климата и погоды накладываются друг на друга и создают сложный интегральный ход изменения метеорологических элементов. В последние два-три десятилетия на естественные климатические циклы все заметнее стали накладываться направленные изменения, связанные с техногенезом.

К сожалению, достоверность и оправдываемость долгосрочных метеорологических прогнозов пока оставляют желать много лучшего. В итоге результаты прогнозов климата получаются разноречивыми, что, в свою очередь, вызывает неоднозначность в мерзлотных прогнозах. Различаются сценарии значительного потепления климата области вечной мерзлоты в XXI веке (М.И.Будыко, О.А.Анисимов, М.К.Гаврилова, Ф.Э.Нельсон) и умеренного потепления (Е.П.Борисенков, А.В.Павлов), имеется даже сценарий похолодания (Н.А.Шполянская). Сценарии значительного потепления климата распространяются на территорию вечной мерзлоты лишь с учетом самых общих ее свойств. По М.К.Гавриловой, к середине грядущего столетия среднегодовая температура воздуха в Сибири и на Дальнем Востоке повысится на 4-10 градусов Цельсия, вследствие чего вечная мерзлота будет оттаивать и со временем сохранится только в высоких горах и на равнинах севера Восточной Сибири и Дальнего Востока. О.А.Анисимов и Ф.Э.Нельсон считают, что увеличение глобальной температуры воздуха на 2 градуса Цельсия приведет к полному оттаиванию мерзлых пород на 15-20 % территории криолитозоны. Метеорологические данные за последние 10-15 лет показывают, что экстремальные сценарии изменения климата не оправдываются, потепление идет, но более скромными темпами.

При обосновании сценариев умеренного потепления климата, помимо данных метеостанций, используются также результаты наблюдений на геокриологических (мерзлотных) стационарах, где одновременно с метеорологическими измерениями исследуются тепловой режим грунтов, сезонное промерзание - протаивание и мерзлотные процессы (А.В.Павлов). Такое сочетание повышает достоверность мерзлотно-климатических прогнозов. Остановимся на этой проблеме подробнее.

До недавнего времени сеть метеостанций на севере России была достаточно разветветвленной; продолжительность метеорологических измерений в нашей стране достигает 180 лет. Кроме того, к началу 1990 г. здесь существовало около 25 геокриологических стационаров - опорных пунктов мониторинга криолитозоны.

При изучении многолетних колебаний современного климата необходимо осреднять метеорологические данные за ряд соседних лет, чтобы исключить случайные вариации. Наиболее часто выбирают период осреднения в 10 лет. Анализ средних скользящих 10-летних значений температуры воздуха, выполненный по ряду регионов севера России, показал, что в большинстве континентальных районах Севера за метеорологический период наблюдений в целом отмечается заметное повышение температуры воздуха (до 2,4 градуса Цельсия в Якутске за 1830-1995 годы). Наоборот, в районах, примыкающих к северным морям, прирост температуры воздуха за все время метеорологических измерений, несмотря на существование ее колебаний в отдельные годы, практически отсутствует. Это дает основание полагать, что в Арктике и некоторых смежных регионах вследствие близости морей и слабого техногенного воздействия современные потепления и похолодания не выходят за пределы естественной вековой цикличности климата. Здесь "маятник" погоды находится в состоянии устойчивого равновесия.

Можно выделить два периода с отчетливо выраженным повышением температуры воздуха на Севере: с конца XIX века по 1940-е годы XX века (этот период называется "потеплением Арктики") и с середины-конца 1960-х годов до настоящего времени (рис. 2). Последнее (современное) потепление пока не достигает размеров "потепления Арктики". Более того, в начале 1990-х годов на ряде арктических метеостанций наблюдалось заметное похолодание. Однако последующие годы оказались достаточно теплыми, что явилось причиной сохранения общей тенденции потепления климата в наши дни.

Рис. 2. Отклонение средних скользящих 10-летних значений среднегодовой (1), среднелетней (2) и среднезимней (3) температур воздуха от нормы в Салехарде (север Западной Сибири)

Темп повышений среднегодовой температуры воздуха за последние 25-30 лет составляет 0,02-0,03 градуса Цельсия в год в условиях Европейского Севера, 0,03-0,07 - на севере Западной Сибири и 0,01-0,08 градуса Цельсия в год - в Якутии. Само повышение температуры воздуха за этот период изменяется от 0,4 до 1,8 градуса Цельсия. Потепление климата обусловлено главным образом повышением зимней температуры воздуха.

Если тенденция к климатическому потеплению сохранится в первой половине XXI века, можно ожидать повышение среднегодовой температуры воздуха к 2020 году на 0,9-1,5 градуса Цельсия и к 2050 году на 2,5-3 градуса Цельсия. Атмосферные осадки к этим же годам возрастут на 5 и 10-15 %, соответственно.

Анализ данных мониторинговых наблюдений и геотермических исследований свидетельствует о широко распространенной деградации верхних горизонтов криолитозоны (повышение температуры вечномерзлых пород, уменьшение их площади, возрастание глубины сезонного протаивания) за последние 15-25 лет. Повышение температуры мерзлоты может быть вызвано как потеплением климата, так и возрастанием снегоотложений.

Рис. 3. Изменение температуры вечномерзлых пород на глубине 10 м на стационаре Марре-Сале (Западный Ямал)...

В качестве наглядного примера происходящих термических изменений в криолитозоне используем данные наблюдений стационара Марре-Сале (Западный Ямал), расположенного на участке одноименной метеостанции. Здесь почти на всех экспериментальных площадках зафиксировано повышение температуры мерзлых пород на глубине 10 м за 1979-1998 годы (рис. 3).

Оно изменялось от 0,1 до 1 градуса Цельсия. Только в полосе поверхностного стока воды (площадка 34) многолетние изменения температуры пород практически не отмечались. По результатам геотермических исследований обнаружено, что современное потепление пород достигает глубин в десятки метров. Рассмотрение материалов наблюдений того же стационара Марре- Сале показывает, что несмотря на большие междугодовые вариации глубины сезонного протаивания, в целом обнаруживается слабая тенденция к ее возрастанию за 1978-1998 годы (рис. 4). Прогнозируемая глубина сезонного протаивания на 2020 год возрастет на Севере всего на 15-20 см в песках, а в супесях, глинах и торфах еще меньше. Прогнозируемые региональные повышения температуры поверхности пород не превысят 1,4 градуса Цельсия на 2020 (2025) и 2,3 градуса Цельсия на 2050 год (таблица).

Рис. 4. Изменение глубины сезонного протаивания пород на стационаре Марре-Сале (Западный Ямал) за 1978-1998 гг...

На рис. 5 показана эволюция вечной мерзлоты в России в том случае, если оправдаются приведенные выше прогнозные оценки потепления климата на Севере в XXI веке. Выделены 4 зоны, отличающиеся разной степенью и неодинаковыми сроками начала повсеместного глубокого оттаивания вечномерзлых пород сверху.

За начало глубокого оттаивания мерзлых пород принят момент, когда слой грунтов, оттаявший за лето, зимой промерзнет не полностью и кровля вечномерзлых пород начнет прогрессивно понижаться. Временной интервал, за который вечномерзлые породы оттают полностью, зависит не только от потепления климата, но также от состава и льдистости пород, их температуры и мощности, от теплопритока снизу (из земных недр). Таяние может продолжаться годами, десятилетиями, сотнями и тысячами лет.

Рис. 5. Вероятные изменения вечной мерзлоты в России при потеплении климата к 2020 и 2050 гг...

При составлении карты-схемы (см. рис. 5) учитывалось, что на одинаковые изменения глобального климата вечная мерзлота в разных ландшафтных условиях будет реагировать по-разному. Наибольший вклад в разнообразие реакции мерзлоты на атмосферные воздействия вносит рельеф земной поверхности. На карте показаны три категории рельефа: равнины, плоскогорья и горы.

Первая с юга зона - это территории, на которых вечная мерзлота к 2020 году будет оттаивать сверху повсеместно, где она развита. Эта зона сформируется только в пределах Западно-Сибирской низменности, на южном пределе современной криолитозоны. Здесь в настоящее время встречаются редкие острова-линзы вечномерзлых пород с температурой выше -0,5 градуса Цельсия, приуроченные к торфяникам. После их оттаивания южная граница криолитозоны отступит к северу на 300 км и более, таяние вспученных льдом торфяников будет сопровождаться интенсивными просадками их поверхности, но серьезных изменений в природную обстановку и деятельность человека это не внесет: вечномерзлые торфяники встречаются редко и в хозяйственную деятельность практически не вовлечены.

Вторая зона - территории, где вечномерзлые породы будут повсеместно таять к 2050 году. На севере европейской части России криолитозона к этому времени отступит в северном или северо-восточном направлении на 50-100 км, в Западной Сибири - на 100- 250 км, на юге Среднесибирского плоскогорья - на 600 км. В горах изменения криолитозоны будут минимальными: острова вечномерзлых пород будут оттаивать повсеместно только на Енисейском кряже и в небольшой части гор Южной Сибири и юго-восточного Забайкалья. Как и в предыдущей зоне, последствия оттаивания мерзлых пород окажутся незначительными: исчезнут острова и небольшие массивы мерзлых пород в самых неудобных для человека урочищах - торфяниках, на сильно замшелых участках тайги, на затененных днищах узких, глубоких долин, на склонах северной экспозиции. Современная температура этих пород не ниже -1 градуса Цельсия.

Третья зона объединяет территории, где к 2050 году глубокое оттаивание вечномерзлых пород начнется не повсеместно. Современная температура вечномерзлых пород здесь меняется в основном в пределах от -1 до -5 градусов Цельсия. Оттаивать будут только малольдистые породы с температурами не ниже -1...-1,5 градуса Цельсия. Это преимущественно пески и скальные породы. Ширина зоны частичного оттаивания вечномерзлых пород на севере европейской части России достигнет 30-100 км, на севере Западной Сибири - 40-200 км, в Восточной Сибири - 240-820 км.

Зона включает в себя также часть низких гор Южной Сибири, Забайкалья, юга Дальнего Востока и Камчатки до 60-62 градусов северной широты.

В четвертую зону, зону относительно стабильных вечномерзлых пород, входит северная часть криолитозоны с самыми низкими температурами пород - от -3 до -16 градусов Цельсия. Мощность их измеряется сотнями метров. При прогнозных масштабах потепления климата глубокое протаивание мерзлых пород на этой территории исключается. Незначительно увеличится лишь площадь таликов.

Таким образом, на основе вышеприведенных данных можно сделать вывод об изменениях криолитозоны России к середине XXI века. Через 50 лет температура поверхности грунтов повысится на 0,9-2,3 градусов Цельсия, а глубина сезонного протаивания увеличится на 15-33%. В результате этого южная граница криолитозоны на равнинах и плоскогорьях отступит к северу и северо-востоку на 50-600 км. Если к зонам полного оттаивания вечномерзлых пород добавить зону частичного их таяния, то в целом образуется полоса деградации вечной мерзлоты, ширина которой на севере европейской части России достигнет 50-200 км, в Западной Сибири - 800 км и в Восточной Сибири - 1500 км. Сильно сократятся, но полностью не исчезнут острова и массивы вечномерзлых пород в горах Забайкалья, юга Дальнего Востока и на Камчатке.

Негативные последствия климатического потепления будут отмечаться на всей территории криолитозоны: усиление деградации мерзлых толщ как по вертикали, так и в плане; нарушение функционирования природно-технических систем, при проектировании которых не была учтена возможность глобального потепления климата и деградации мерзлоты. На территории, где вечномерзлые породы относительно стабильны (третья и четвертая зоны на рис. 5) из-за высокой льдистости верхнего горизонта мерзлых пород даже небольшое увеличение глубины сезонного протаивания приведет к активизации таких разрушительных мерзлотных процессов, как термокарст, термоэрозия и солифлюкция. Усилятся процессы разрушения береговых уступов арктических морей. Экономика Севера потребует дополнительных затрат для обеспечения сохранности мерзлого основания зданий и инженерных сооружений.

Непринятие своевременных защитных мер может обернуться катастрофой.

Ожидаемое к середине XXI века потепление климата и криолитозоны сопоставимо с потеплением в период голоценового климатического оптимума 4600-8000 лет назад, когда южная граница криолитозоны отступила к северу и заняла положение, близкое к прогнозируемому ее положению в 2050 г. На территориях, где вечная мерзлота сохранялась, увеличивалась глубина сезонного протаивания. Анализ строения верхнего горизонта вечномерзлых пород позволяет установить глубину сезонного протаивания в это время. В арктических и высокогорных районах она оказалась на 20-40 % больше современной глубины, то есть сопоставимой с прогнозируемой величиной прироста мощности сезонноталого слоя к 2050 году. Подобное совпадение лишний раз подтверждает реальность предложенного сценария потепления климата и криолитозоны.

**Список литературы**

Анисимов О.А., Нельсон Ф.Э. Прогноз изменения мерзлотных условий в северном полушарии: применение результатов балансовых и транзитивных расчетов по моделям общей циркуляции атмосферы // Криосфера Земли, 1998, 2. С. 53-57.

Борисенков Е.П. Изменение климата и человек. М.: Знание, 1990.

Будыко М.И. и др. Предстоящие изменения климата // Изв. АН СССР. Сер. геогр., 1992, 4. С. 36-52.

Мельников Е.С., Гравис Г.Ф., Конченко Л.А., Молчанова Л.С. Карта криогенных геологических процессов криолитозоны России (м-б 1:7500000) // Итоги фундаментальных исследований Земли в Арктике и Субарктике. Новосибирск: Наука, 1997. С. 279-286.

Монин А.С., Шишков Ю.А. История климата. Л.,Гидрометеоиздат, 1979. 408 с.

Общее мерзлотоведение (геокриология) / Под ред. В.А.Кудрявцева.М.: Изд-во МГУ, 1978. 464 с.

Павлов А.В. Закономерности формирования криолитозоны при современных изменениях климата // Известия РАН, серия геогр.,1997, N 4, c. 61-73.